

電波技術協会報

2022 11
No.349

フォルン
Future
Of
Radio
Network
FORN



オルタナティブICT 特集：早稲田大学理工学術院

連載記事ほか

Reea

Radio Engineering & Electronics Association

電波技術協会報

フォルン
Future
Of
Radio
Network
FORN

2022 11
No.349

オルタナティブICT
特集：早稲田大学理工学術院

- 2 早稲田大学国際情報通信研究センター (GITI) の紹介
早稲田大学 嶋本 薫
- 4 多角的な通信技術研究及びその応用システム
早稲田大学 嶋本 薫
- 8 360度カメラと深層学習を活用した歩行者レーダーマッピングシステム
早稲田大学 村山 知輝 金井 謙治 孫 鶴鳴 甲藤 二郎
- 12 テラヘルツ通信の最前線
早稲田大学 川西 哲也
- 16 情報通信ネットワークの基盤となる光通信技術の進化
早稲田大学 森田 逸郎
- 20 構造制約付き最適化と機械学習
早稲田大学 笠井 裕之
- 24 ヒトゲノムデータの活用を促進する秘密計算技術
早稲田大学 清水 佳奈
- 28 Beyond 5Gに向けた無線要素技術間連携に関する取り組み
早稲田大学 前原 文明

re:marks!

- 32 非地上系ネットワークを作る新たな通信技術
国立研究開発法人情報通信研究機構 辻 宏之

Close-up

- 36 衛星伝搬の壺 <2>
電気通信大学名誉教授 唐沢 好男
- 40 SOMETHING NEW
企画プロデューサー 新山 賢治

放送歴史 / 通信史書

- 44 テレビ放送、あっという間に70年 <6>
株式会社テレビ朝日 福田 俊男

デジタルな法律相談ちゃんねる

- 48 見えない給与
弁護士 杉本 隼与

各界だより

- 50 総務省、REEA ほか

【表紙の写真】

左：早稲田キャンパスの大隈銅像（写真内左）と大隈記念講堂（写真内右）
右上：電波伝搬特性測定用短波帯アンテナを西早稲田キャンパス理工学術院
66号館屋上に設置する様子（写真中央左手に新宿高層ビル群を望む）
右下：留学生と研究する電波暗室での UAV 実験の模様
（掲載協力・画像資料提供：早稲田大学、同大学理工学術院嶋本研究室）

早稲田大学 国際情報通信研究センター(GITI)の紹介

GITI : Global Information and Telecommunication Institute

～ 情報通信分野研究のアジアの中核を目指す ～

GITI は早稲田大学理工の富永英義先生、KDDI 研究所所長の浦野義頼氏、ATR 所長の寺島信義氏、東京大学田中良明先生、NTT 松本充司氏らによって 1998 年に早稲田大学内に設立された常設の研究機関である。2000 年には私学としては珍しい独立大学院である国際情報通信研究科 (GITS : Global Information and Telecommunication Studies) を連携大学院として発足させ、更に新たに多くの研究員、教員が参加した。本稿では GITI のこれまでの経緯や、活動を述べ、今後の展開の展望を示す。



GITI 発足時の基本コンセプト

早稲田大学
基幹理工学部情報通信学科 教授
国際情報通信研究センター 所長
嶋本 薫

早稲田大学国際情報通信研究センター（以下 GITI）は情報通信分野を広く横断的に研究を行う常設の研究機関として発足され、当初より国際展開と関連分野の融合を目指すことを命題に設立された。また、総務省を始めとする多くの政府機関、研究機関との連携も模索し、海外大学、海外研究機関との連携など多くの研究プロジェクトを先導してきた。また、海外からも多くの研究者、教員が参加し早稲田大学と他大学との連携として数多くの合同ワークショップを開催している。また、イベントとしては GITI フォーラムを毎年開催しており、そこでは各分野の第一人者が登壇し、テーマに沿った講演、パネル討論等を行ってきた。現在は早稲田大学の専任教員 30 名、招聘研究員等の研究員 50 名程度の組織として日々研究を行っている。本稿では国際連携とフォーラムを中心にその活動の一端を紹介する。

国際連携

GITI では情報通信分野のもつ国際的な特徴である国際標準に着目し関連の研究者、教員などに参加頂き多くの研究成果を上げている。通信分野の国連機関である ITU の元事務総局長である内海善雄氏を客員教授で迎えたほか、動画像圧縮の分野では世界的な権

威であるイタリアのレオナルド キャリリオーネ氏を教授で迎え入れ GITI での研究活動、更には関連大学院である GITS における教育活動を行った。通信分野における国際標準が大変重要であるという認識から、ITU に働きかけ世界で初めて大学として ITU との包括協定を締結し情報交換や寄書等の活動を円滑に可能な環境を構築した。また、海外大学との連携としては中国 北京大学、清華大学、韓国 漢陽大学等との交換講義、合同研究発表などを行う他、チリ、ベトナム、タイなどの大学とも遠隔講義を通じて国際貢献を行ってきた。GITS では多くの留学生を受けて教育を行っておりその数は約 60 か国、修士課程で 800 人、博士課程で 80 名近くの学生が在籍しており、修士課程では日本人学生との比率はほぼ同等であった。講義は主として英語であり、日本語を学ばなくても修了できる大学院として多くの留学生が受験している。

GITI フォーラム

GITI では年に一度フォーラムを開催し、設定されたテーマに従った内外の第一人者に登壇を依頼し、その後討論会を行った。具体的な事例としてこの 2 年のテーマと登壇者を以下に示す。（敬称略）

❖ 2021 年テーマ「宇宙通信新時代」

「宇宙通信の国際動向と日本の戦略」
藤野克（総務省大臣官房審議官）
「超小型衛星の潮流と宇宙通信技術への期待」
中須賀真一（東京大学工学系研究科教授）
「宇宙利用の動向と展望 -Space Port などの取り組み-」
山崎直子（元 JAXA 宇宙飛行士）
「光衛星通信新時代」
豊嶋守生（NICT ワイヤレス研究センター長）
「はやぶさ 2 の深宇宙通信とこれから」
戸田知朗（宇宙科学研究所宇宙機応用工学准教授）
「宇宙エレベータ構想及びその応用通信システムの展望」
大野修一（宇宙エレベータ協会 会長）

❖ 2022 年テーマ「ICT 国際戦略の展望」

「日本の ICT 国際戦略」
山内智生（総務省大臣官房審議官）
「ICT 分野における特許国際戦略」
高野洋（特許庁審査長）
「NTT 研究グループにおける国際戦略」
川添雄彦（NTT 副社長）
「KDDI における国際技術戦略と標準化活動」
小西聡（KDDI 先端技術研究所所長）
「中国国内における ICT 国際戦略」
Zhisheng Niu（清華大学教授）
「intel の国際技術戦略」
庄納崇（インテル業務執行役員）
「HUAWEI の国際戦略」
郭宇（華為技術日本部長）



GITIForum2022 の模様（2022 年 6 月 4 日開催）

このようにいずれも該当分野の第一人者に登壇を頂いており、内外からも多くの参加者を得るほか、電子情報通信学会誌にもその模様が掲載されるなど多くの注目を集めている。今後もタイムリーな話題で ICT 分野の振興に繋がる企画を行いたいと考えている。

* GITI の HP にてフォーラムの模様を現在動画配信中（2022 年 12 月 31 日まで）

GITI の今後の展望

このように GITI は早稲田大学における常設の研究機関として多くの国際連携、関連研究推進を行ってきた。関連大学院である GITS は理工学部の再編に伴い新たに設立された基幹理工学部情報通信学科にマージされ現在も活動を続けている。GITI の現在は情報通信学科の教員を中心に学内の他学部、他学科の教員など 30 名近い専任教員が参加し、更に総務省を始めとした省庁、他大学、企業、通信業者など多くの研究者が招聘研究員として名を連ね、その数は 30 名を超えている。このように ICT に関係する教員、研究者が集う GITI では多くの委託研究、共同研究を受託し、社会に貢献するほか、人材育成などの観点からも専門的、学際的の両面から幅広く人材を育てている。今後の GITI の展望としては、引き続きはフォーラムや研究プロジェクトを推進することを基盤とし、更に国際連携を強化するために新たに GITW（Global Information and Telecommunication Workshop）を創設する。これはこれまでに培った海外大学との関係を集約しワークショップを GITI が主催し開催するものである。

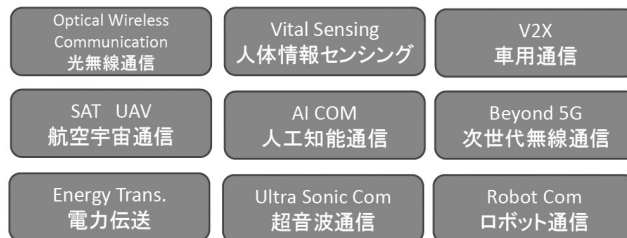
中国清華大学、国立台湾大学をはじめとするアジアの大学から欧米まで 20 校あまりの大学が参加し、各大学の研究成果を 2022 年 12 月に発表する。そこでは学生の研究成果発表、教員、学生間での交流、更には国際連携研究プロジェクトの模索を一同に行うもので、今からその成果が期待できる。今後はこの GITW を中心に大学の国際連携の輪が広がることに期待が高まっているが、そこでは多くの GITS の卒業生が母国に戻り大学教員としてこのワークショップに参加することを表明しており、GITI、GITS のこれまでの成果が既に現れている。今後は情報通信分野研究のアジアの核としてその地位を確立するための方策を多角的に考えていきたい。



多角的な通信技術研究及びその応用システム

～ 嶋本研究室研究紹介 ～

早稲田大学基幹理工学部情報通信学科、国際情報通信研究センター嶋本研究室では無線通信方式を中心に数多くの分野の研究が行われている。無線通信研究で培った技術の応用として光無線通信から、超音波通信まで多様なメディアに対するアプローチと応用範囲としてもバイタルセンシングやV2X (Vehicle to Everything) さらにはRFIDなど波及分野も広い。本稿ではそれら多岐に渡る研究分野の一部を紹介する。



嶋本研究室研究分野例

早稲田大学
基幹理工学部情報通信学科 教授
国際情報通信研究センター 所長
嶋本 薫

< 多元アクセス方式に関する研究 >

嶋本研究室ではこれまでに多くの多元アクセス方式を提案しており、例えばランダムアクセス方式の持つ即時性と割り当て方式の持つ信頼性を融合させる方式としてFAWAC (Fixed Assignment based Window Access with Capture) 方式を提案している。データ発生時刻のタイミングが予め各局に設定されたウィンドウ内であれば割り当てられたスロットを用い、ウィンドウ外であればランダムアクセスを行う方式であり、全く性格の異なる2方式の融合度合いをウィンドウ値一つによって調整可能な方式である。

更に電力軸を組み合わせることで低遅延かつ高いスループットが得られ、両方式のハイブリッド方式ではそれまで得られなかった優れた特性が得られている。

また更に電力軸を用いたアクセス方式としてPDMA (Power level Division Multiple Access) 方式を提案しており、NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) 等で用いられるSIC (Successive Interference Cancellation) を併用することで更なるスループットの向上が得られる。

電力割り当てをサイクリックに各局に割り当てることで公平性の問題を解消し、高いスループットを実現する手法を提案し、更に各適用システムに応じた電力割り当て法手法を提案している。

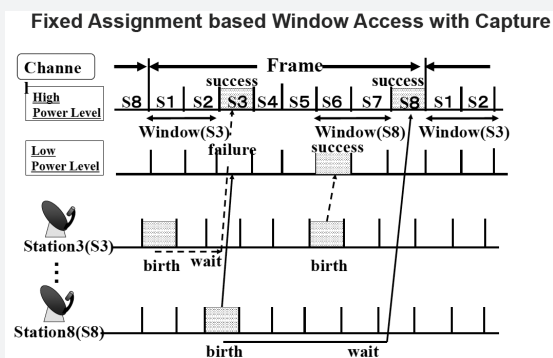


図1 FAWAC方式のアクセス概念図

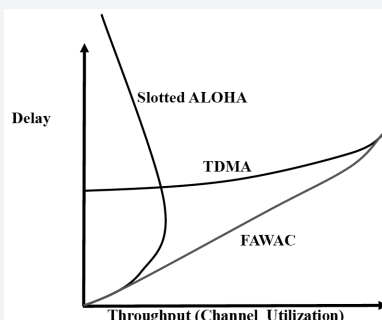


図2 FAWAC方式と他方式の性能評価

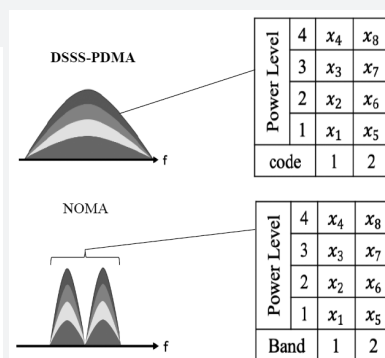


図3 PDMA方式の電力割り当て例

＜バイタルセンシングに関する研究＞

研究室では超音波から無線、光信号を用いた各種バイタルのセンシング方法を研究している。これまでの成果として非接触での血中酸素濃度、脈波、血圧、血糖値の推定に成功してる。

血糖値は潜在的にも多くの罹患患者が存在し糖尿病の早期発見や患者の行動変容につながる重要な指標であるが、現状では指等の穿孔による血液取得によるものが主流であるため負担が大きいのが課題である。中赤外光を用いた血糖値の推定では各種 AI 学習方式での推定を試み高い精度での血糖値推定が可能であることを確認している。また、血圧に関しても電波を用いた推定を行っており、携帯端末からの信号を用いて無意識のうちに血圧の取得を行うことが目標であり、現在は 2.4GHz の信号を用いて、高い精度での血圧推定に成功してる。

これらの成果を元にスマホ依存症やストレスの把握などの検討を現在鋭意行っている。

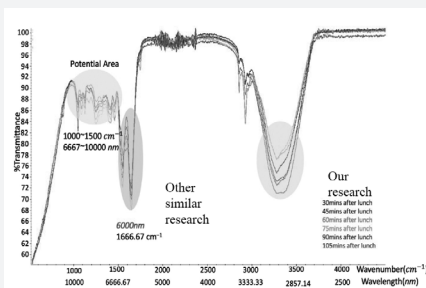


図 4 中赤外領域の血糖値の吸収の違い

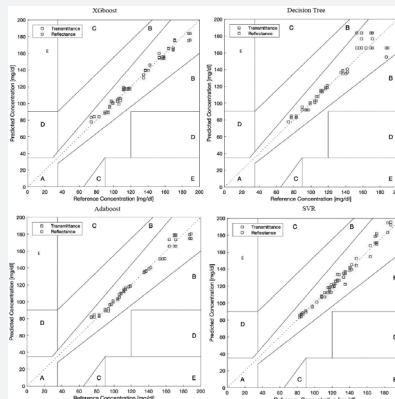


図 5 血糖値推定の学習方式の違いによる推定評価

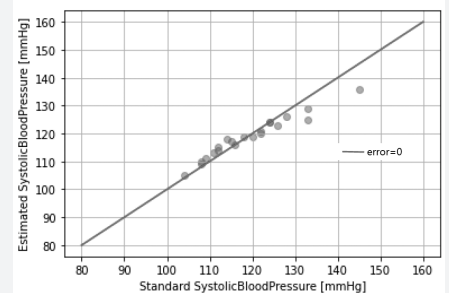


図 6 AI を用いた 2.4GHz 信号での血圧推定結果

＜航空宇宙通信に関する研究＞

2000 年に大樹町で HAPS (High Altitude Platform System) を想定した仰角別の電波伝搬実験を行って以来、非常時用通信や UAV を用いた広域センシング方式、航空機間アドホックネットワーク、低軌道衛星を用いた通信網、光衛星間通信など数多くの研究を行ってる。HAPS 通信を想定し、ビル等の遮蔽を正確に表現する伝搬モデルを構築し都市規模別の通信特性を取得した。航空機間通信を用いたグローバル通信網システムから UAV を用いた非常時通信システムなど数多くのシステムをモデル化し、それぞれに適した通信方式を提案してきた。

更には衛星を用いた車両・信号機を中継とした次世代 6G システムなどに関して検討を行っている。

応用研究としてテラヘルツでの HAPS 通信や OTFS (Orthogonal Time Frequency and Space) 方式を取り入れたシステムなど多岐に渡る。研究室ではこれまでのアクセス方式に関する取り組みと、光無線など多メディアを組み合わせたシステム構築を多角的に検討しており、現在では宇宙エレベータを用いたグローバルシステムや Space IOT に関する検討を手掛けている。

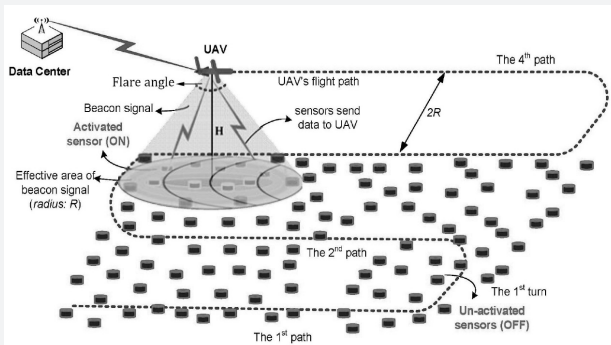


図 7 UAV を用いた広域センシングシステム

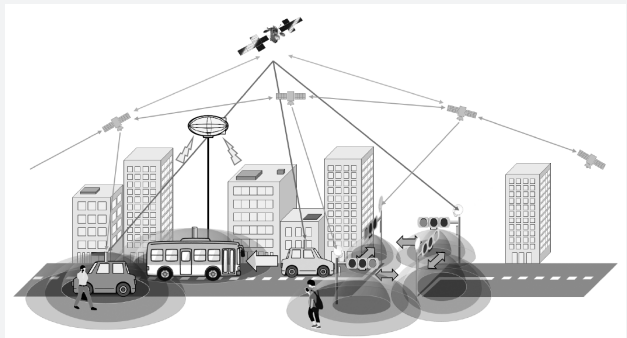


図 8 衛星信号を車両・信号機で中継したシステム

＜ V2X に関する研究 ＞

車車間通信を中心に多くの研究を行っており、テーマとしては隊列走行時のアクセス方式や信号送信車両推定方式など多岐に渡る。将来的には信号機のない交差点の実現を目指して研究を行っていく。

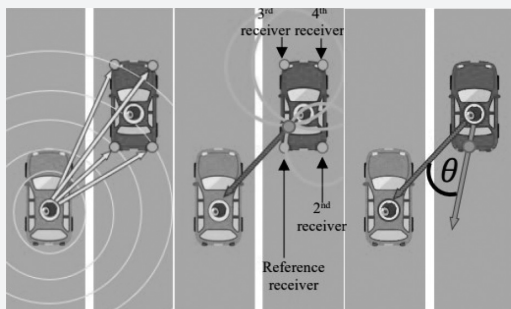


図 9 信号送信車両推定方式のモデル図

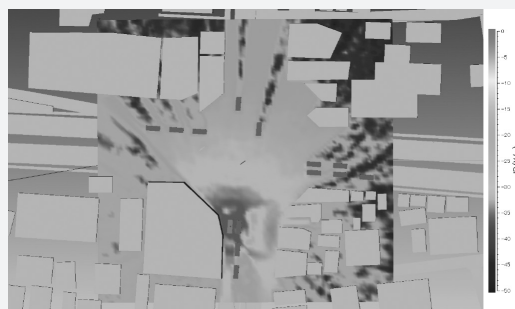


図 10 車両中継基地局からの電波伝搬の様子 (28GHz)

＜ ロボット内、車両内通信に関する研究 ＞

ロボット関連技術の急速な進歩により、人型ロボットの実用展開は非常に早いものと思われる。研究室ではロボット内の信号線（ハーネス）を全て無線化することで、軽量化や動きの柔軟性に優れた通信環境を提供することを目指している。対抗となるのは有線通信であるため超多チャンネルと時間軸でのダイバーシチ構成の方式を提案し超低遅延かつ信頼性の高い通信方式を構築した。更にロボット内の伝搬状況を正確にシミュレートし、ロボット内無線通信に適した周波数、方式を検討した。

更には車両内での無線化の検討と、光ファイバ化に関する検討も行っており、これは光ファイバでの信号の伝送と光電力伝送を組み合わせた取り組みで同様の取り組みは以前、BS アンテナから宅内に引き込む際 4K 放送など高い IF 周波数が同軸ケーブルでの高い減衰を受けることから光ファイバ化を導入し、室外アンテナ ODU (Out Door Unit) に対する給電を同じファイバで逆方向に重畳する方式を提案したことがあり、その手法を車両内通信に適用した。

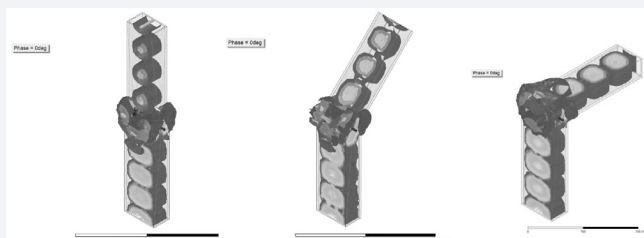


図 11 ロボット内電波伝搬のシミュレーション

＜ 次世代型 RFID 用通信 ＞

カーボンナノチューブを用いた塗布型の次世代 RFID システムの開発を行っており、そこでは同時に対数のタグを読み取るための多元アクセス方式の検討を行っている。またその応用として食品等すべてのバーコードがタグに置き換わることを想定し、例えば冷蔵庫内の食品を庫内のリーダーが RFID 通信で一瞬で把握し消費期限切れなどの懸念が無くなるシステムを提案している。

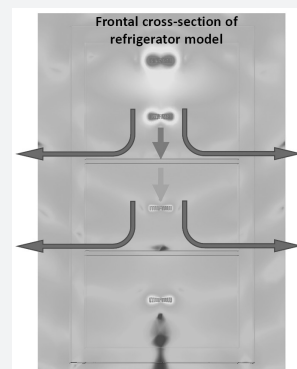


図 12 RFID 信号の冷蔵庫内での伝搬

＜ FT8 利用したグローバルな電離層状況把握 ＞

短波帯の通信は現状では船、航空機などの通信と国際的な通信に限定されるが、直接的に電波が到来するため、広域通信でありながら中継不要であり伝搬遅延が小さくブロックチェーンなどへの適応が期待されている。研究室ではその伝搬の様子をレイトレーシング*1で再現し、位相制御によるフェージングの軽減化方式を提案している。また、伝搬状況のよりグローバルで、リアルタイムでの把握を行うため、FT8（新デジタル通信モード）と呼ばれる国際的な短波帯でのデータ通信に着目し、そのユーザーに作成したアプリケーションを配布し、短波帯での通信状況を広く全世界からインターネット経由で集め、リアルタイムでの全地球規模での電離層状況把握を行うことを計画している。

今後はこのような得られたグローバルな電離層活動状況を広く世界に公開し社会に還元していく予定である。

*1 電波を光に見立てて直接波や反射と回折のパスを近似したものである

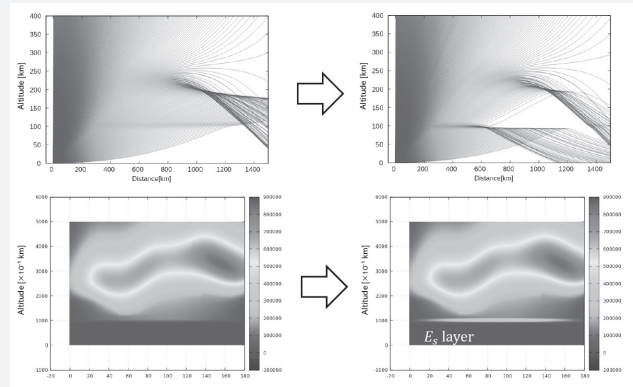


図 13 電離層反射パス及び電離層電子密度の推定

＜参考文献＞

- [1]Chaoyi Yang, Junlong Wang, Zhenni Pan, and Shigeru Shimamoto, " Delay-Doppler Frequency Domain-Aided Superimposing Pilot OTFS Channel Estimation Based on Deep Learning" , Chaoyi Yang, Junlong Wang, Zhenni Pan, and Shigeru Shimamoto, IEEE VTC 2022-fall, London, Sep.,2022
- [2]Megumi Saito, Takashi Koshimizu, Zhenni Pan, Jiang Liu, Hayato Nakazawa, and Shigeru Shimamoto, "Energy Borrowing Transmission Scheme Based on D2D Communication for 5G Networks" , IEEE Access , December 2021
- [3]Junlong Wang, Chaoyi Yang, Zhenni Pan, Shigeru Shimamoto "Optimization on OTFS Modulation Channel Estimation Path Employing CNN-based Self-Adjustment Model," 2022 IEEE ICC , 2022, pp. 951-956
- [4]Gentarō Konishi, Megumi Saito, Shigeru Shimamoto, Shinji Horii, Seiichiro Murase, "ALOHA-SIC-based RFID System Assisted by the Internal Structure of Smart Refrigerators," in the 16th IEEE RFID 2022, May, 2022
- [5]A. Hossain; Z. Pan; M. Saito; J. Liu; S. Shimamoto, "Robotic Inner Signal Propagation and Random Access over Hybrid Access Scheme" , International Journal of Computer Networks and Communications, vol. 12, no. 4, pp. 71-89, July, 2020
- [6]Liu Jiang, Shigeru SHIMAMOTO, "Non-invasive Blood Glucose Measurement with Mid-infrared Signal by Machine Learning Schemes" IEEE Globecom 2022, to be appear.



基幹理工学部情報通信学科情報理工・情報通信専攻 嶋本研究室

嶋本研究室は現在嶋本薫（教授、代表）、劉江（准教授）、PAN ZHENNI（講師）、齋藤恵（講師）、吉井一駿（助手）の職員と数名の招聘研究員、研究助手をスタッフに、内外から 40 名程度の学生と共に研究活動に励んでいる。海外からの留学生、職員の比率が高く研究ゼミなどでも半数近くが英語で発表し、日本人学生でも自発的に英語で発表するものも少なくないなど国際色が豊かな研究室といえる。学会発表等も海外の国際会議、国際ジャーナルへの投稿が多くその影響からか、世界中から学生が集まる状況になっている。国や多くの企業からの委託研究、共同研究を行っており、現在も多くのプロジェクトが推進中である。

<https://www.shimamotolab.sci.waseda.ac.jp/>
<https://www.facebook.com/groups/442314825816762>



鴨川のセミナーハウスで行われた夏のゼミ合宿の集合写真
（筆者前 2 列目左（2019 年夏季撮影））

360度カメラと深層学習を活用した歩行者レーダーマップシステム

「スマート自転車とオープンデータを活用した道路インフラ維持システム」と題して3年間進めた研究プロジェクトから、災害時の避難経路誘導やCOVID-19の混雑度検知に有用な、360度カメラと深層学習を活用した歩行者レーダーマップシステムの成果報告を行う。

早稲田大学
理工学術院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻¹⁾
理工学術院総合研究所²⁾
国際情報通信研究センター³⁾
村山 知輝¹⁾ 金井 謙治²⁾ 孫 鶴鳴²⁾ 甲藤 二郎¹⁾²⁾³⁾



混雑度ヒートマップ（早稲田大学西早稲田キャンパス周辺）

はじめに

近年、インフラの老朽化問題や、地震などの自然災害などの影響から都市モニタリングの重要性が高まっている。またCOVID-19の感染拡大に伴い群集エリアの特定の需要が高まっている。歩行者密度を推定する手法としてWi-Fiの接続履歴やLiDARを利用するセンサーベースのアプローチと画像取得によるコンピュータビジョンベースのアプローチが挙げられる。本稿では、後者のアプローチとして、歩行者密度をレーダーマップとして可視化するシステムを提案する。また、システムを異なる実装手法によって実装し、効率的なリソース割り当てを行うための評価実験も行う。

歩行者レーダーマップシステム

❖プロトタイプシステム

電動アシスト自転車に計測系、演算系、通信系を装着し、バッテリーから給電する系をスマート自転車と呼び、図1には、このスマート自転車とクラウドシステムを連携させた道路インフラモニタリングシステムのプロトタイプ構成を示す。スマート自転車は、道路や歩道上の画像をタイムスタンプやGPSによる位置情報と共に収集し、収集した画像はLTEや5G通信を利用してクラウドシステムに送信する。クラウドシステムでは、(a)道路の損傷検出、(b)段差検出、(c)人物・混雑度検出などの深層学習による道路画像処理を実行する。また、深層学習アルゴリズムの学習には、画像データベースに格納されたオープンデータとスマート自転車で取得した画像群を活用し、画像処理結果は、自治体やスマート自転車利用者にフィードバックする。自

動車による道路インフラ監視は一部で実用化されており、将来的にはこの自動車インフラ監視システムとの統合を目指す。本稿では特に、360度カメラを計測系に使用した人物・混雑度検出に関する歩行者レーダーマップシステム[1]の研究成果について報告する。

❖歩行者レーダーマップ

プロトタイプでは、路上に存在する歩行者の位置を360度レーダーマップとして可視化する。本システムでは、深層学習による人物検出と奥行き推定を活用し、1枚の360度画像からレーダーマップの自動生成を行う。処理の流れを以下に示す。

- ①前処理：360度画像は通常、歪みを持った正距円筒図法と呼ばれる形式で保存されているため、通常の2次元画像に変換する必要がある。そこで前処理として、360度画像を水平視野角90度ごと（前後左右の4方向の画像）に分割し、さらにその4画像に心射図法を適用し、通常の2次元画像への変換を行う。
- ②人物検出：前処理の適用後、分割された画像（前後左右の4方向の画像）ごとに人物検出[2]を行い、人物の矩形領域の座標抽出を行う。
- ③距離推定：次に、深層学習を用いた単眼画像からの奥行き推定手法を使用し、カメラから歩行者までの距離 d を推定する。距離推定は、図2に示すように、既存のDisnet[3]、Ama-Net[4]、VGG-16[5]の組合せで行う。Disnetは矩形領域のサイズによる距離推定、Ama-netは画像のボケ度合いによる距離推

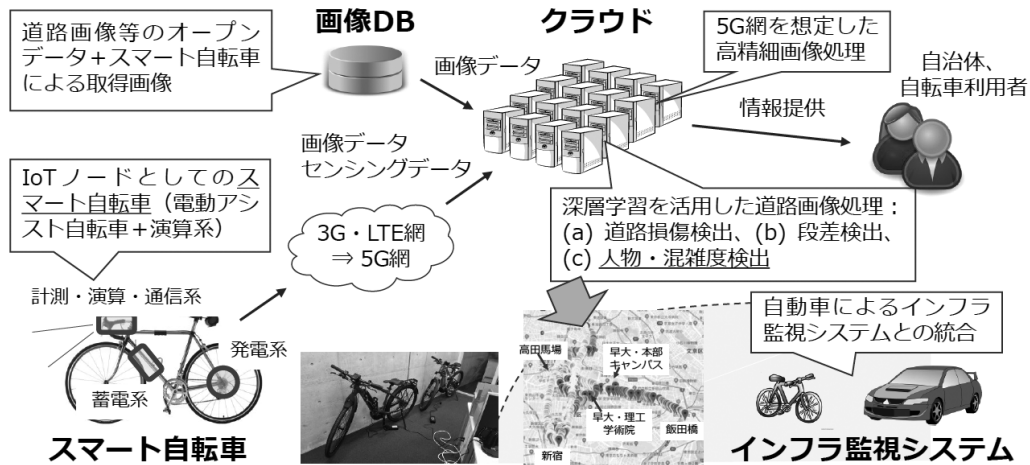


図1 プロトタイプ構成図(スマート自転車による道路インフラ監視システム)

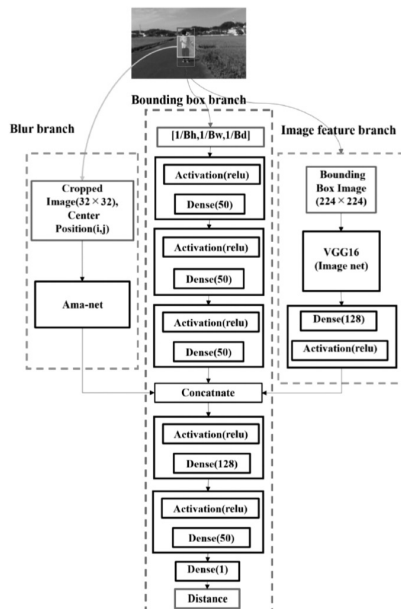


図2 距離推定ネットワーク

定であり、VGG-16は物体認識を目的とするが、その中間層出力を距離推定の補正に使用する。これらの結果を統合し、回帰によって人物ごとの奥行きを推定する。

④角度推定：前の処理と並行して、カメラから歩行者までの方向を推定する。画像上における矩形領域の x 座標から、極座標空間における歩行者の位置 (d, θ) における θ を推定する。角度推定の実装は回帰推定を使用する。

⑤レーダーマップ可視化：最後に、検出された歩行者の極座標 (d, θ) 360度のレーダーマップとして可

視化する。このレーダーマップから、式(1)によって密度を算出する。

$$\text{密度} = [\text{検出歩行者数}] / [\text{レーダー円面積}] \quad (1)$$

❖評価実験(データセットと実環境)

まず、車載映像から成るKITTIデータセット[6]を用いて、歩行者レーダーマップと歩行者密度推定の精度評価を行った。KITTIデータセットでは歩行者位置の真値も提供されており、340枚の時系列画像を評価用データセットとして利用する。図3には、推定した歩行者レーダーマップの一例を示す。また図4には、340枚の時系列画像を対象とした密度推定結果を示す。一部の画像において誤検出や検出漏れも見受けられるが、群集レベルの傾向を大まかに把握できることが確認できる。

次に、大学周辺の実環境において、360度カメラで撮影した画像群を使用し、同様の実験を行った。図5

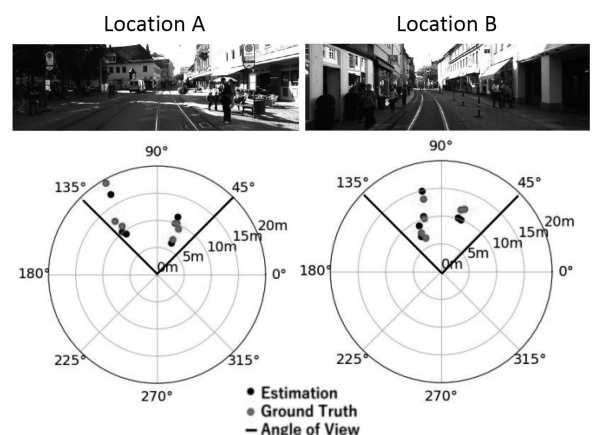


図3 歩行者レーダーマップの推定例(KITTIデータセット)

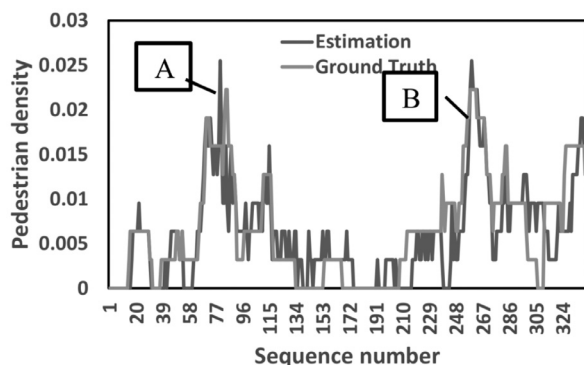


図4 密度推定結果 (KITTI データセット)

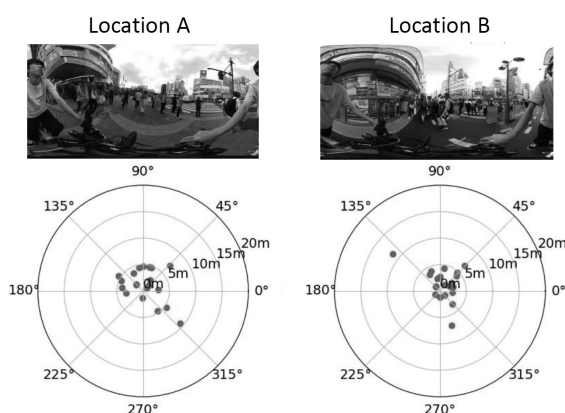


図5 歩行者レーダーマップの推定例 (実環境)

には推定した歩行者レーダーマップの一例を示す。また、冒頭の図には、早稲田大学西早稲田キャンパス周辺で計測した密度をマップ上に可視化した混雑度ヒートマップを示す。大学周辺の明治通り、早稲田通り、大久保通り沿い等で計測を行い、山手線の高田馬場駅、新大久保駅周辺の混雑度が高いことがわかる。

本混雑度計測の応用として、当初は自治体による災害時の避難誘導経路の作成等を想定していたが、本研究プロジェクトの実施中に COVID-19 が感染拡大し、現在は COVID-19 対策としての応用も検討している。

クラウド実装

❖処理ブロックの分割

前章の歩行者レーダーマップシステムを、表1のように6つの処理ブロックに分割する。

❖クラウド実装手法

分割した6つの処理ブロックを、クラウドシステム上で、次の2手法で実装を行う。

表1 レーダーマップシステムのプロセス分割

PID	名称	処理内容
1	Image	画像特徴量の抽出
2	Bbox	歩行者矩形領域の抽出
3	Blur	ぼけ特徴量の抽出
4	Regression	奥行き方向の回帰推定
5	Angle	歩行者の角度推定
6	Map	レーダーマップを出力

① Microservice (並列処理)

Microservice による実装では、各処理を別々のマシン上に実装する。レーダーマップを出力するまでの処理時間 T_{mi} と使用 CPU リソース量 R_{mi} は、(2)~(4)式で表される。ここで $PID=j$ 番のプロセス処理時間 t_j は、事前実験によって求めたリソース量 r_j と処理時間のプロファイリング結果 f_j を用いて算出する。また N_d は検出された歩行者数を示す。

$$T_{mi} = N_d * \max(\max(t_1, t_2, t_3) + t_4, t_5) + t_6 \quad (2)$$

$$t_j = f_j(r_j) \quad (3)$$

$$R_{mi} = \sum_{j=1}^6 r_j \quad (4)$$

$$1 \leq j \leq 6, j \in \text{pid}, r_j \in \text{resource}$$

② Monolith (逐次処理)

Monolith による実装では、6つの処理ブロックすべてを1つのマシン上で実装を行う。Monolith 実装における処理時間 T_{mo} と CPU リソース量 R_{mo} は(5)~(7)式によって表される。

$$T_{mo} = N_d * \sum_{i=1}^5 t_i + t_6 \quad (5)$$

$$t_j = f_j(r_j) \quad (6)$$

$$R_{mo} = r_j \quad (7)$$

$$1 \leq j \leq 6, j \in \text{pid}, r_j \in \text{resource}$$

リソース割り当て評価

① Microservice の最適リソース割り当て

Microservice における CPU 割り当てパターンの最も効率的な組合せの探索を行う。これは、式(2)~(4)による数値計算により CPU リソース量の合計 R_{mi} と処理時間 T_{mi} の関係を求めた (図6)。

② 数値計算による CPU リソース比較

(5)~(7)式を用いて Monolith における CPU リソース量の合計と処理時間を計算し、Microservice との比較を行った (図 7)。この結果から、特性変化点より左側の領域では Microservice によって処理時間、リソース量を抑制できていることを確認した。

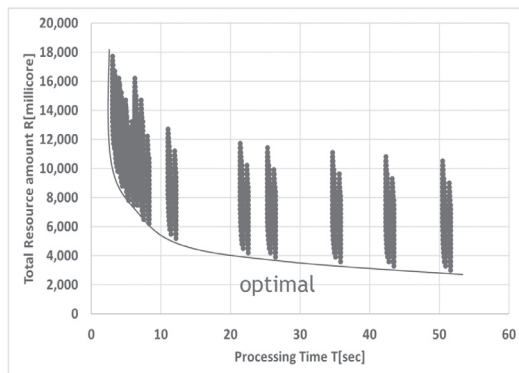


図 6 CPU リソース全探索

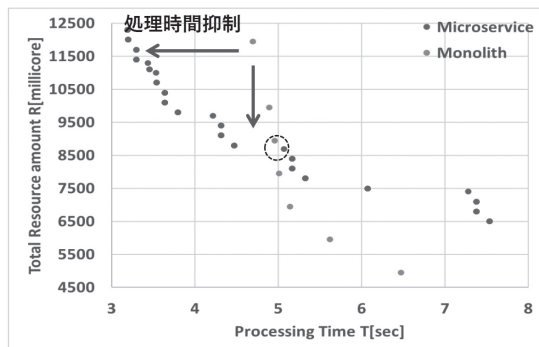


図 7 Monolith と Microservice の比較

まとめ

本稿では、歩道上の人密度を可視化するための歩行者レーダーマップシステムと、そのシステムのクラウド実装に関する研究開発の紹介を行った。本研究開発は、災害時の避難誘導経路の作成や、COVID-19 における混雑対策としての応用が期待される。

謝辞

本研究成果は情報通信研究機構「データ連携・利活用による地域課題解決のための実証型研究開発」課題番号 20010 の支援を受けている。

<参考文献>

- [1] K. Murayama, et al.: "Deep Pedestrian Density Estimation for Smart City Monitoring," IEEE ICIP 2021, Sep.2021.
- [2] J. Redmon and A. Farhadi: "YOLOv3: An Incremental Improvement," <https://arxiv.org/abs/1804.02767>, Apr.2018.
- [3] M. A. Haseeb, et al.: "Disnet: A Novel Method for Distance Estimation from Monocular Camera," PPNIV 2018, Oct.2018.
- [4] M. Kashiwagi, et al.: "Deep Depth from Aberration Map", IEEE CVPR 2019, June 2019.
- [5] K. Simonyan, et al.: "Very Deep Convolutional Networks for Large-scale Image Recognition," ICLR 2015 May 2015.
- [6] A. Geiger, et al.: "Vision meets robotics: The KITTI dataset," International Journal of Robotics Research, 2013.
- [7] <https://www.katto.comm.waseda.ac.jp/~katto/e-bike/>



理工学術院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻 甲藤研究室

甲藤研究室では、留学生 6 名を含む学生 22 名、留学生 2 名を含む研究員 3 名、および甲藤の 26 名の体制で、マルチメディア信号処理と情報ネットワークの研究開発に取り組んでいます。これは、甲藤が企業時代に画像圧縮とテレビ電話・テレビ会議の研究開発と国際標準化活動に従事していたため、研究室を一言で表せば「画像通信」の研究室と称しています。以前は、有線・無線ネットワークから音響信号、水中ネットワークに至るまで、あらゆるネットワーク上で画像伝送を実現する方式開発や、画像通信に各種のセンサー、IoT デバイス、LiDAR 等、画像通信を高度化する可能性を探求していました。また、この 5 年ほどは、世界的なトレンドに合わせ、深層学習の研究開発にも力を入れており、画像圧縮からネットワーク制御に至るまで、深層学習の適用先を拡げています。本稿の内容は 2018 年～2020 年の情報通信研究機構プロジェクト「スマート自転車とオープンデータを活用した道路インフラ維持システム」に関するものですが、2021 年からは新たに情報通信研究機構の Beyond 5G シーズ創出型プログラム「低遅延でインタラクティブなゼロレイテンシー映像・Somatic 統合ネットワーク」の研究開発を開始しています。

<https://www.katto.comm.waseda.ac.jp/>



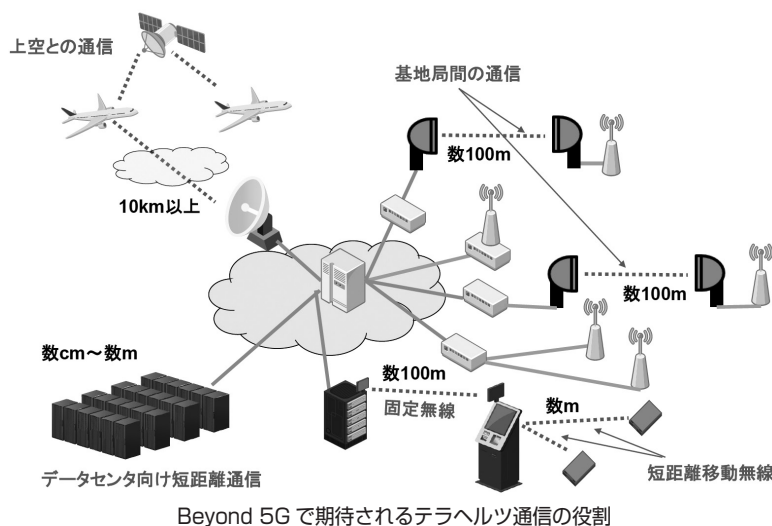
研究室集合写真 (コロナ禍前の 2019 年卒業式 / 筆者前列中央)

テラヘルツ通信の最前線

～ 莫大な周波数資源を有効活用 ～

テラヘルツ通信はその帯域幅の広さから様々な分野での活用が期待されているが、その伝送距離の短さから有線ネットワークとのシームレスな連携が必須である。本稿では、テラヘルツ波の特徴や技術課題を概説するとともに、光ファイバとテラヘルツ無線の融合技術の動向を紹介する。

早稲田大学
理工学術院基幹理工学部電子物理システム学科
電子物理システム学専攻
国際情報通信研究センター
教授 川西 哲也



はじめに

我々の生活を支えるインフラとして電波の果たす役割は21世紀に入ってから非常に大きくなってきているが、未だその拡大はとどまるところがない。サービスが端緒についたばかりである第5世代移動通信システム(5G)を特徴づける新たな電波としてミリ波が注目を集めている。次の世代の移動通信システム(Beyond 5G)ではテラヘルツ波が大きな役割を担うことが期待され、数多くの研究プロジェクトが進められている。

これまで、周波数が数GHz程度のマイクロ波が無線通信を支えてきた。無線技術の発展を振り返ると、より広い帯域を確保するために、より高い周波数の電波資源の開拓を繰り返してきた。その一端を、電波帯域の名前に垣間見ることができる。例えば、すでにサービスを停止した地上波アナログテレビで用いられていた帯域は超短波、英語ではVHF (Very High Frequency) とよばれているが、現在の技術水準から見ると、波長が特に短いわけではない。また、周波数も高いとはいえない。無線技術の黎明期の視点で命名されているといえる。ミリ波はその波長がミリメートルオーダーであることから命名されている。この根拠に従うと、マイクロ波は波長がマイクロメートルオーダーということになるが、実際にはマイクロ波帯の電磁波の波長はセンチメートルオーダーで、ミリ波よりもサイズが大きいということになる。これは、マイク

ロ波帯が新たな電波帯域として開拓された際に、その新しさを強調するために、非常に小さなサイズの電磁波ということを指してマイクロという言葉が使われたためにおきた命名規則の不統一といえる。このような電波帯域の名称の実態を学生に講義で説明する際には労を要する。無線技術発展の歴史を理解するための機会を与えてくれるが、体系的に電磁波の特徴を学ぶ上では混乱の原因となり得る。

テラヘルツはそこでさらに異質な名称といえる。光と電波の境界に位置しているということを反映しているともいえる。従来の帯域では波長や周波数の大きさの相対比較で名前がつけられていることが多いが、テラヘルツ波は其中で周波数を表す単位である「ヘルツ」と10の12乗を示す接頭語「テラ」の組み合わせである「テラヘルツ」が由来である。FMラジオ放送で使われている周波数数十メガヘルツの電波を「メガヘルツ」とよぶことはない。テラヘルツ帯の開拓は、これまで一貫して続いてきたより高い周波数帯を目指すという方向性の延長線上にあるものの、効率的な利活用にはテラヘルツ波の物理的な性質を反映した可能性と限界を深く掘り下げ、新しい概念に基づくネットワークの構築が不可欠であると考えている。その広帯域性からテラヘルツ波は通信のみならずレーダなどのセンシングなど幅広い分野での活用が期待されているが、伝搬可能距離の短さから有線ネットワークとのシームレスな連携が必須である。以下では、テラヘル

ツ波の特徴、技術課題、光ファイバ通信との融合の必要性を説明するとともに、テラヘルツ無線の研究動向について説明する。

テラヘルツ波の特徴

テラヘルツ波とは周波数 0.1THz から 10THz の電磁波である。従来の電磁波の分類ではミリ波からサブミリ波、遠赤外線にまたがる帯域に相当する。電波として最も周波数が高いサブミリ波と光波としては最も波長が長い遠赤外線を含んでおり、電波と光の性質をあわせもつ。図 1 にテラヘルツ波とその他の電磁波の周波数・波長範囲を示す。テラヘルツ波よりも周波数が低い範囲では、電子回路で構成された発振器で電磁波を発生させる。これは、導体内の自由電子の集団的な運動を電磁波に変換するという原理に基づいている。他方、より高い周波数帯では量子化された電子のエネルギー準位間の遷移による光子の発生が、電磁波発生の原理として広く用いられている。前者は電子回路の動作可能周波数により、発生可能な電磁波の周波数に上限がある。後者では、一つ一つの電子の遷移が光子を発生させるが、準位間のエネルギー差が光子、つまり、電磁波の周波数に比例する。周波数が低くなると、個々の光子のもつエネルギーが小さくなり、発生効率が大きく低下する。このことにより、量子効果による光子発生ではその周波数に下限がある。図に示したようにテラヘルツ波は従来技術では発振器の周波数上限と、光子発生の周波数下限の間に位置しており、その発生が困難であった。

テラヘルツ帯では大気減衰が大きく、伝搬距離を大きくとることができないという課題もある。より低い

周波数帯では障害物による波動の回折が伝搬特性を支配しているのに対して、より高い周波数の光波では散乱が卓越している。テラヘルツ波はこれらの特徴をあわせもつ。モノづくりの点でも課題がある。アンテナやフィルタなどの電子部品は対象となる電磁波の波長と同程度のスケールのサイズをもつ。電波帯域では機械加工技術で十分対応できるスケールであるのに対して、光波帯域では半導体微細加工技術に適したスケールとなる。テラヘルツ帯では、機械加工にとっては小さすぎ、半導体加工にとっては大きすぎるため、低コストで量産化を進める際の大きな課題となると思われる。

このように利用を進める上では様々な課題を抱えるテラヘルツ波であるが、帯域幅の広さが大きな魅力であり、次世代移動通信システム Beyond 5G や第 6 世代移動通信システム (6G) を支える伝送媒体の一つとして注目を集めている。電波としての特徴を表 1 に列記した。帯域幅を生かしたテラヘルツ帯ならではの無線技術が期待される。これに加えて、マイクロ波帯をはじめとする既存電波資源の逼迫を解消するために、テラヘルツ帯でも問題ないという用途は積極的にテラヘルツ帯への移行を検討すべきである。

表 1 テラヘルツ波の電波としての特徴 [1]

特徴	×	○
大気減衰大きい	長距離伝送困難	近距離なら適用可能
波長が短い	障害物に弱い	細いビームでエネルギー集中できる
帯域幅広い		高速伝送・高精度センシング可能

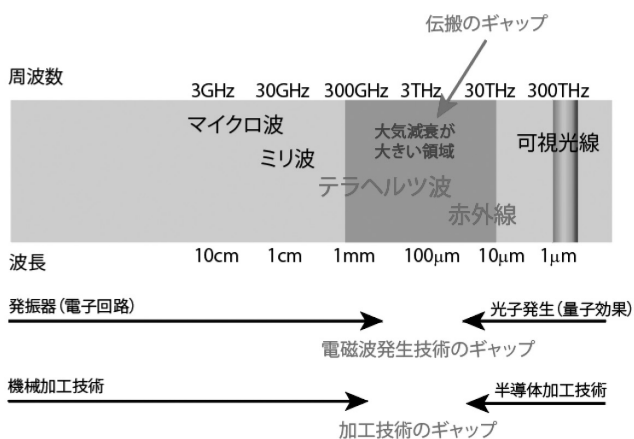


図 1 テラヘルツ帯の周波数・波長範囲 [1, 2]

テラヘルツ無線の研究動向

上述の通り、テラヘルツ波発生は電子回路の高速化という低い周波数帯からの拡張と、光子発生の長波長化というアプローチがある。従来の電波技術との親和性から、テラヘルツ無線に関する研究の多くは、高速動作可能な電子デバイスをベースとしている。デバイス内の電子の移動速度が有限であることなどに起因する動作速度の上限に加えて、電流を伝える役割を担う導体の内部で損失が周波数増大に応じて大きくなるという物理的な限界がある。特に電気信号をケーブルなどで離れたところに伝えるときにこの損失が大きな課題となる。

これに対して、光ファイバ通信で無線波形を伝送するファイバ無線が注目されている(図2)。電気信号を光変調器で光信号に変換する必要があるが、光ファイバの低損失性、広帯域性を生かして、無線波形を必要とまで効率的に伝えることができる。高速信号に対応した光検出器で光信号から無線波形を取り出すことができる。

さらに、テラヘルツ波発生に光信号を積極活用する技術も研究が進んでいる。2つのレーザ光源を同時に光検出器に入力すると、その波長の差に相当する周波数成分が電気出力として得られる。光ファイバ通信でよく使われる1550nmの波長帯において、1nmの波長差の2つの光源を用いると、周波数0.125THzの信号が発生する。一般にレーザ光は波長揺らぎをもっており周波数差が変動する。安定したテラヘルツ波の発生にはレーザの安定化が必須である。波長揺らぎの影響を抑えるために、一つのレーザからの光に対して、高速動作可能な光変調器でテラヘルツ信号成分を印加するという方法がある。このようなテラヘルツ信号に、光ファイバ通信向けの高速変調で発生させた光信号を混合することで、テラヘルツ通信用の広帯域信号発生が実現されている。電子回路のみで構成する場合に比べて複雑となるが、光通信向けに開発された装置を流用し、比較的容易に高速テラヘルツ通信が実証できるので、多数の研究報告がなされている。

電波資源逼迫緩和にはより高い周波数帯の開拓と周波数利用効率の向上という二つの方策が有効である。テラヘルツ帯はまだ逼迫しておらず利用可能周波数帯域も広いので、現時点では利用効率向上の優先順位は低いといえる。これまでの電波資源開拓の歴史を見ると、新たに利用がはじまった帯域においても、その帯域を用いた無線端末の普及が進むにつれ、周波数資源の逼迫が顕著となり、さらに高い周波数帯の開拓への期待が高まるということ過程を繰り返してきた。周波数の高い帯域を開拓すると同時に周波数利用効率の向上も実現することが理想である。電波資源逼迫緩和への貢献の度合いを示す指標として、無線システムの搬送周波数と周波数利用効率の積を用いて、テラヘルツ

帯の研究動向を分析した例を図3に示す。横軸が搬送周波数、縦軸が指標である。図中の各点が論文などでの研究報告されたものから算出された貢献度を示す。周波数300GHz以下では周波数に比例して貢献度が増加しているが、より高い周波数帯では急減している。これは、300GHzを超える周波数帯では周波数利用効率を犠牲にしないと、周波数を高めることができないことを意味している。デバイス性能が十分でなく、信号強度や受信感度の不足などが課題となっていることを示している。貢献度のピークが周波数資源開拓の最前線に相当するといえる。確実性の高いハードウェアでシステムを構築する必要がある場合には周波数300GHz以下の帯域を用いることが適当ということを示唆している。

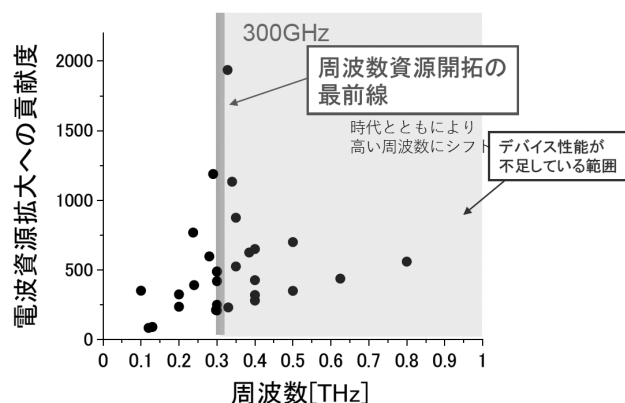


図3 テラヘルツ通信の研究開発動向[1]

むすび

テラヘルツ通信は万能ではないがネットワークの一部として光ファイバ通信と融合することで様々な形での利用が進むと期待している。例えば、上空では大気薄いので地上と比較して長距離の通信が可能となる。Beyond 5G/6Gでは莫大な数の基地局をネットワーク化する必要があるが、そのすべてを光ファイバ通信でカバーするのは難しいとの予測がある[3]。図に示すような、短距離のテラヘルツ通信と光ファイバ通信の組み合わせが大きな役割を担うことが期待される。データセンタ向けの短距離通信も検討されており、低遅延伝送やバックアップ回線の実現が期待される。

情報通信ネットワークは日常生活において、物理的な距離を意識せずに、人と人をつなぎ役割を果たしている。また、ネットワークを構成する要素自体も仮想化技術により、ハードウェア

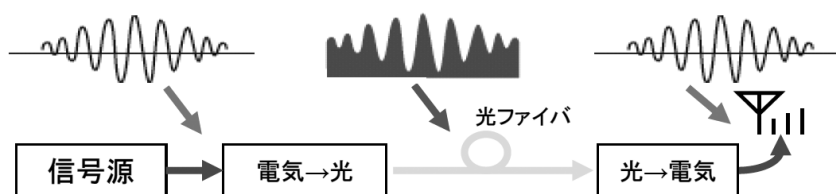


図2 ファイバ無線の基本構成[2]

にしばられない存在となりつつある。しかしながら、情報は必ず何らかの物理実体の上に存在していて、伝送媒体、記録媒体のもつ物理的性質に起因する限界をもつ。顕著な例の一つが、光速が有限であることに起因する信号伝搬に要する時間であろう。しかしながら、ユーザが最先端ハードウェアの役割を直接的に感じる事が難しくなっている。伝搬に要する時間の話など考えたこともなかったという学生が増えているのも仕方がないことかもしれない。

テラヘルツ帯の開拓は種々の物理的な制約との戦いである。物理実体から自由になった世界で新たなことを生み出すことは尊いことであるが、物理法則にしばられた電波資源開拓の最前線への挑戦も避けて通ることのできないことである。昨今の半導体不足は、ハードウェア供給のための製造体制確立の重要性を浮き彫りにするとともに、仮想空間は最先端ハードウェアに物理的に依存していることを示している。筆者の研究室では複数のテラヘルツ通信に関するプロジェクトを実施しているが、このような研究活動を若手の教育に

つなげることが重要である。物理の視点で情報通信システムを俯瞰することができる人材の育成に貢献したいと考えている。

謝辞

本稿は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（採択番号 00302、00401、04301 および 04901）、総務省の「電波資源拡大のための研究開発」(JPJ000254)のうち「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」によって実施した成果を含む。また、本稿で紹介した研究は早稲田大学理工学術院総合研究所の支援を受けたものである。

<参考文献>

- [1]総務省 デジタル変革時代の電波政策懇談会 資料 5-1-4
- [2]T. Kawanishi, Wired and Wireless Seamless Access Systems for Public Infrastructure, Artech House 2020.
- [3]Mobile backhaul options, Spectrum analysis and recommendations, GSMA, 2018
- [4]川西哲也, レーダ・インフラ利用に向けた無線・光融合基盤技術, 2022年信学会ソサイエティ大会

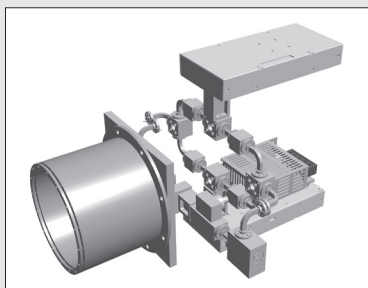
基幹理工学部電子物理システム学科電子物理システム学専攻 川西研究室

早稲田大学理工学術院基幹理工学部電子物理システム学科では、基礎物性・エレクトロニクス・フォトンクス・システム設計の4つの分野をベースとしており、量子力学などの基礎物理から情報科学までをカバーする幅広い分野を網羅した教育カリキュラムを有している。

その中で川西研究室は光無線融合技術分野を担当している。研究テーマは光デバイス、光学設計、ファイバ通信、ミリ波レーダ、テラヘルツ通信などである。Beyond 5G 関連の研究プロジェクトを受託している。テラヘルツ通信関連では、上空との通信のためのテラヘルツ無線機開発や、テラヘルツ波散乱解析などがあげられる。また、海外との共同研究も積極的に実施しており、今年6月に、欧州との共同研究で、世界初の双方向 300GHz リアルタイムテラヘルツ伝送のデモンストレーションに成功した。その成果をもとにした国際共同研究を推進するためのプロジェクトも受託しており、日欧の技術を結集したテラヘルツ無線装置の開発を進めている。

配属された学生には、最新の実験機器にふれながら、新しいテーマを自ら設定し、それを実証していくプロセスを体験する機会を与えるように努めている。光無線融合技術をベースとする滑走路監視レーダに関する国際共同研究を立ち上げ、マレーシア・クアラルンプール空港構内にて実施した実験に、修士学生を参加させた例がある。大型の航空機をターゲットとして、不要な干渉を抑圧する実験を学生自ら立案し、その効果を実証し、論文執筆につなげた。これは、大学、企業、公的機関の国際連携によるものである。今後とも、研究室として様々な機関との共同研究を積極的に進めながら、学生にも国際共同研究を推進するスキルを身につけてもらいたいと考えている。

<http://www.f.waseda.jp/kawanishi/>



テラヘルツ無線装置の設計例



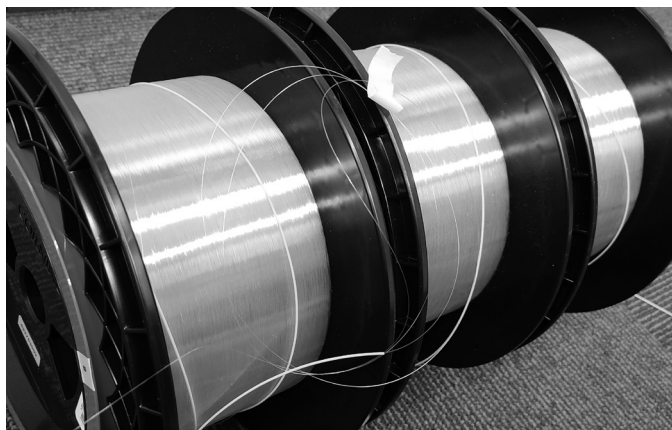
クアラルンプール空港でのミリ波レーダ実験の様子

情報通信ネットワークの基盤となる 光通信技術の進化

～ 情報通信社会の持続的な発展に向けて ～

光通信技術は、大容量のデータをやり取りする情報通信ネットワークを構築するために不可欠な基盤技術である。今後、ユーザがやり取りする情報量はますます増加することが予想されており、それに対応するためには、光通信技術の継続的な発展が必要である。

本稿では、光通信技術のこれまでの発展の概要と、今後の新たな展開について紹介する。



光ファイバリール

早稲田大学
理工学術院基幹理工学部情報通信学科情報理工・情報通信専攻
国際情報通信研究センター
教授 森田 逸郎

はじめに

現代の情報通信社会においてやり取りされるデータは増加の一途をたどっている。情報通信ネットワークはデータをやりとりするために不可欠な社会基盤であり、そこで取り扱われる情報量は、インターネットを用いた高画質な動画視聴の一般化や、メタバース等の新たなサービスの進展などにより、近年、飛躍的に増大している。さらに、最近では、コロナ禍における社会構造の変化により、その増大に一層の拍車がかかっている。光通信技術は、そのような大容量の情報をやりとりする情報通信ネットワークを構築するために不可欠な基盤技術であり、情報通信ネットワークの至る所で用いられている。

図1に情報通信ネットワークの概要を示す。情報通信ネットワークの主要構成要素は、ユーザを通信事業者のネットワークに接続するアクセス網と、通信事業者の局舎間を接続するメトロ/コア網である。日本のような島国では、海外と接続するために、海底ケーブルや衛星通信が用いられる。最近では、大量のデータを取り扱うデータセンターはますます大規模化しており、データセンター内の機器を接続する通信網やデータセンター間を接続する通信網の役割も大きくなっている。

このような情報通信ネットワークの中で、光通信技術の適用範囲は、通信距離が1km以下の高速イーサネットを用いる構内ネットワーク（LAN）から、1万km級

の大洋横断級の光海底ケーブルにまで広範囲に及んでいる。特に、国際間を結ぶグローバル通信においては、その99%以上が光海底ケーブルで運ばれており、現在、敷設された光海底ケーブルに用いられている光ファイバの総量は120万km（地球30周分）以上にも達している。

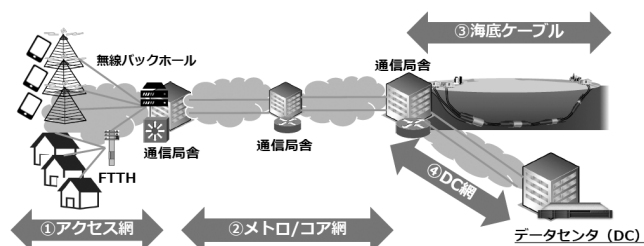


図1 情報通信ネットワークの概要

光通信技術は、1966年にカオ氏（2009年にノーベル賞受賞）が低損失光ファイバを提唱以来、半世紀に渡り技術革新を繰り返し、急増する通信トラフィックを収容する通信インフラ構築技術としてその役割を果たしてきた。今後も継続的に増加することが予想されている通信トラフィックを安定的に収容するためには、さらなる技術革新が必要になる。本稿では、光通信技術のこれまでの発展の概要と将来に向けた新たな展開について概観する。

光通信技術のこれまでの進展

図2に光通信システムの代表例として、日本国内の主要都市間を結ぶ陸上基幹系光伝送システムと日米間の太平洋横断光海底ケーブルシステムの通信容量の推移を示す。これらのシステムでは、システムを構成する光ケーブル内に複数の光ファイバが収容されるが、ここでは、1本の光ファイバ当たりの通信容量を示した。

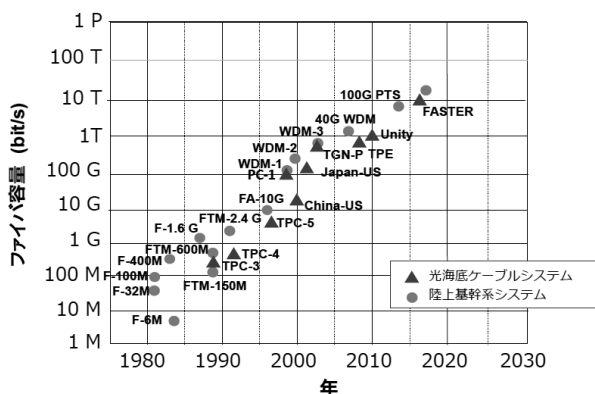


図2 光ファイバ通信容量の推移

図2より、光ファイバの通信容量は30年で1万倍程度の著しい速度で増加していることが分かる。このような飛躍的な大容量化は、光増幅技術、波長多重伝送技術、デジタルコヒーレント受信技術に代表される種々の革新的技術の導入により実現されてきた[1]。光ファイバ通信システムは、これらの技術の導入による大容量化により、テレックス、電話から電子メール、さらには高画質動画へと変化する通信需要の変化へ対応してきた。最近まで、通信トラフィックは年率30～40%程度の割合で継続的に増加してきたが、コロナ禍における社会構造の変化により、通信トラフィックはさらに増加することも予想されている。仮に通信トラフィックが年率30～40%程度の割合のままで伸びていくと仮定しても、2030年代には、現在の100倍以上の通信トラフィックとなることが想定される。そのため、基幹系光伝送システムではファイバ当たりの伝送容量を現在の毎秒10テラビット級から毎秒1ペタビット(ペタはテラの千倍)級へ大容量化することが必要になる。通信システムを大容量化するためには、基本的にシステム内の信号パワーを大きくする必要がある。しかし、光ファイバ中の10 μ m程度のコアに光信号を閉じ込めて伝送する光ファイバ通信においては、高パワー化により光ファイバ中のエネルギー密度が非常に高くなる

ため、光パワーにより屈折率が変化する光ファイバの非線形光学効果や、高パワーにより光ファイバ自体が熱損傷するファイバヒューズが発生するため、従来の光ファイバでは毎秒100テラビット程度のファイバ容量が物理的な限界と言われている。そのため、従来の光ファイバの限界を打破するための技術として、空間多重伝送用光ファイバや空孔コア光ファイバ等の従来の光ファイバの限界を打破する新規光ファイバの検討が盛んとなっている。

空間多重伝送用光ファイバ

空間多重(SDM: Space Division Multiplexing)光伝送方式は、マルチコア光ファイバ(MCF)やマルチモード光ファイバ(MMF)を用いて、「コア」や「モード」毎に独立な情報を伝送することで、一本の光ファイバで伝送できる情報容量を大幅に拡大する技術である。

図3にSDM伝送方式に用いられる光ファイバの断面図を示す。従来の光ファイバでは、光ファイバ中に一つのコアを設け、一つのモードのみを伝送する(単一コア・単一モード)のに対し、MCFでは、複数のコアを光ファイバ中に設ける。一方、MMFは、コア径を単一モードファイバよりも大きくして、複数のモードが伝搬するように設計された光ファイバである。MMF自体は単一モードファイバ以前に開発され、初期の光伝送システムから用いられていたが、その際には、各モードを区別することなく、全てのモードで一種類のデータが伝送されていた。SDM伝送方式では、MMFを伝搬するモードを個別に扱い、それぞれのモードで独立なデータを伝送することで、伝送容量の拡大を図る。この場合、光ファイバ中を伝搬するモード数を10程度に制限することが多いため、数モードファイバ(FMF: Few Mode Fiber)とも呼ばれる。FMFでは、コア径や屈折率分布を適切に設定するこ

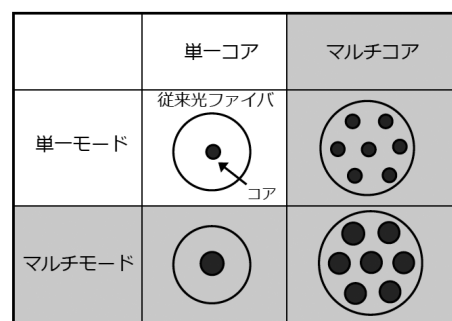


図3 光ファイバの断面図

とで、所望のモードが伝搬するよう設計される。さらに、MCFの各コアをマルチモード化したマルチモード・マルチコアファイバ(MM-MCF)もSDM伝送用の光ファイバとして用いられる。この場合、(コア数)と(モード数)の積倍の伝送容量増加が図れるため、超大容量伝送用の光ファイバとして魅力的である。伝送距離は10km程度に制限されているが、MM-MCFを用いた毎秒10ペタビット(毎秒1京ビット)級の伝送実験も報告されており、光ファイバ通信の伝送容量が「京」の領域に到達可能であることが示されている[2]。

日本はSDM伝送技術の研究開発において、世界を先導してきた。「光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会(EXAT:EXtremely Advanced Transmission Technologies)」は、世界に先駆けて、従来光ファイバの限界を打破する革新技術の必要性を提言し、SDM伝送方式の研究開発を主導した[3]。本研究会は、情報通信研究機構(NICT)の呼びかけにより2008年1月に発足し、2010年4月からは電子情報通信学会の研究専門委員会となった。本研究会の提言等により、2008年から国内ではSDM伝送技術に関する多数の国家プロジェクトが連続的に立ち上げられ、数多くの成果があげられている。2018年～2022年に実施された総務省プロジェクト「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発－マルチコア大容量光伝送システム－(OCEANS)[4]」では、MCFの具体的な適用先として海底ケーブルシステムを想定し、世界初のMCFを収容した光海底ケーブルの試作等、実用化に向けた技術開発が行われた[5]。

SDM伝送方式の研究開発が本格的に開始されてから10年以上が経過し、技術も成熟してきているため、早期の実用化が期待される。

空孔コア光ファイバ

従来の光ファイバは、コアの屈折率をその周辺のクラッドよりも高くすることで、全反射の原理により光を伝搬させている。一方、図4(b)、(c)に示すような空孔コア光ファイバでは、フォトリソバンドギャップ効果やアンチレゾナント効果を用いて、空孔コア中に光を閉じ込めて伝搬させる。空孔コア光ファイバでは、ほとんどの光が空孔コア中に閉じ込められて伝播するため、従来のガラスでコアが形成される光ファイバでは実現困難な様々な特性を実現することが可能となる。

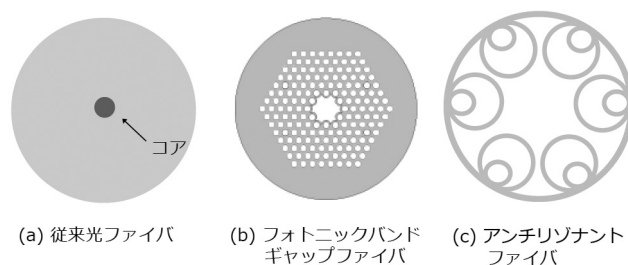


図4 従来光ファイバと空孔光ファイバの断面図

空孔コア光ファイバでは、従来光ファイバでは実現できない極低損失性、極低非線形性、超広帯域性、低遅延性等の実現が期待されており、これらの特性は将来の伝送システム用光ファイバとして非常に魅力的である。その中の低遅延特性は、光通信システムに対する従来からの要求(大容量化)とは異なる要求に応えるものであり、金融分野の高速取引やBeyond5G/6Gにおける各種遠隔制御等を実現するために必要となる。空孔光ファイバでは、実効屈折率が従来光ファイバの約2/3になるため、30%以上の伝送遅延の短縮が見込まれる。

ただし、空孔光ファイバには、製造性等まだまだ多くの課題が残されている。特に損失に関しては、従来光ファイバのレイリー散乱による損失限界を打破する究極の低損失性の可能性を有しているものの、試作された光ファイバでは、従来光ファイバに対して桁違いに大きな損失しか実現されていなかった。最近になり、アンチレゾナントファイバにおける構造の最適化により、損失が急激に低減され、従来光ファイバとほぼ同等レベルの値が報告されるようになった[6]。それを契機に、一気に注目を集めるようになっており、今後の進展が期待される。

新規領域への展開

これまで光通信技術は、光ファイバを用いた有線通信技術として主に展開されてきた。しかし、より広範囲での大容量通信の需要の高まりと共に、光ファイバを用いない光無線通信技術の重要性も高まっている。図5に示す通り、光通信技術の新たな適用先としては、海中通信や宇宙通信が注目されている。

特に、宇宙通信に関しては、SpaceXによるStarlink等による多数の低軌道衛星を用いた衛星コンスタレーションによる通信サービスも開始されており[7]、全世界をカバーする今後の新たな通信ネットワークとして期待されている。その高速大容量化に向けて衛星間通信への光通信技術の適用が検討されている。また、

今後、月や火星等との深宇宙通信の需要も高まると予想される。NASA は「アルテミス計画」と呼ばれる月面探査プログラムにおいて、2024 年までに月面に人類を送り、その後、月周回有人拠点等を通じて、月に物資を運び、月面拠点を建設、月での人類の持続的な活動を目指しており、JAXA もこの計画に協力している[8]。このような月面での活動が本格化すると、より大容量の通信が不可欠となり、その実現手段として光通信技術が有力な候補となる。

このような従来の光ファイバ通信とは異なる新規領域へ光通信技術を適用する場合には、要求条件が従来とは大きく異なるため、そのような新規の要求を満足するための研究開発が、今後本格化すると予想される。

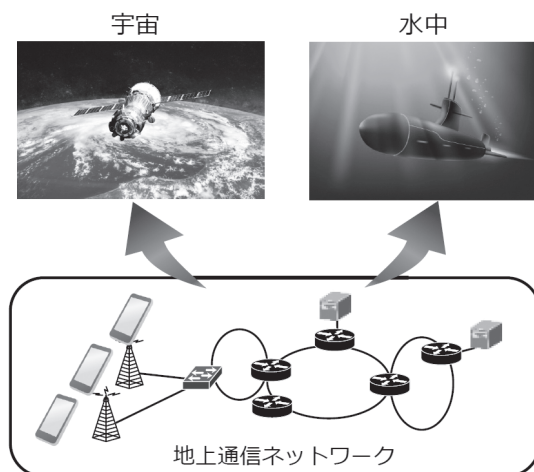


図 5 光通信技術の新規領域への展開

まとめ

光通信技術は、技術革新を繰り返し、急増する通信トラフィックを収容する通信インフラ構築技術としてその役割を果たしてきた。今後も継続的に増加することが予想されている通信トラフィックを安定的に収容することに加えて、これまで光通信技術があまり適用されてこなかった新規領域へ展開するためには、さらなる技術革新が必要となる。関連分野の研究開発を通じて、情報通信ネットワークのさらなる発展に貢献していきたい。

<参考文献>

- [1]宮本裕、森田逸郎、“大容量光中継伝送技術”、電子情報通信学会誌、Vol.100、No.28、pp.783-788 (2017)
- [2]D. Soma, et al., "10.16-Peta-B/s Dense SDM/WDM Transmission Over 6-Mode 19-Core Fiber Across the C+L Band," J. Lightwave Technol., vol. 36, no. 6, pp.1362-1368 (2018)
- [3]盛岡敏夫、淡路祥成、“光通信インフラの飛躍的な高度化に向けた取り組み”、電子情報通信学会誌、Vol.97、No.2、pp.98-101 (2014)
- [4]総務省、革新的光ネットワーク技術の研究開発の推進 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd257240.html>
- [5]KDDI総合研究所、東北大学、住友電気工業、古河電気工業、日本電気、オプトクエスト、“世界に先駆け、マルチコアファイバによる光海底ケーブルの大容量化を実現する基盤技術を開発・実証 ～既存システムの 7 倍の容量拡大可能性を確認～”、2022 年 3 月 28 日、<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2022/032801.html>
- [6]P. Poggiolini and F. Poletti, "Opportunities and Challenges for Long-Distance Transmission in Hollow-Core Fibres," J. Lightwave Technol., Vol. 40, No. 6, pp.1605-1616 (2022)
- [7]<https://www.spacex.com/>
- [8]<https://humans-in-space.jaxa.jp/future/>

基幹理工学部情報通信学科情報理工・情報通信専攻 森田研究室

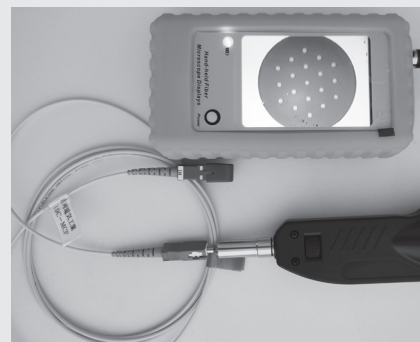


研究室前の筆者

森田研究室は 2022 年 4 月に開設したばかりの研究室です。まだまだメンバーも少ない小規模な研究室ですが、本稿で紹介した新規光ファイバを用いた大容量光ファイバ通信技術、宇宙等の新規領域へ適用するための光通信技術に関する研究、光通信ネットワークへの機械学習の適用や、光コンピューティングのような通信とは異なる領域への光技術の適用に関する研究にも取り組んでいます。
<https://www.f.waseda.jp/it-morita/>



「早稲田大学オープンキャンパス (2022 年 8 月) での光通信技術の紹介」



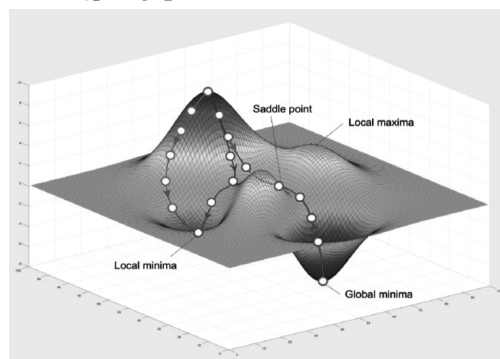
紹介した 19 コアファイバ (古河電気工業提供)

構造制約付き最適化と機械学習

～ 幾何的性質に着目した最適化手法の研究とその応用に向けて ～

人工知能で注目されている機械学習問題に現れる多くの問題は「最適化問題」として定式化される。本稿では、構造制約を有する連続最適化問題のうち「リーマン多様体最適化問題」と「最適輸送問題」を取り上げ、その技術概要と研究室における研究事例について紹介する。

早稲田大学
理工学術院基幹理工学部情報通信学科
理工学術院大学院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻
国際情報通信研究センター
教授 笠井 裕之



最適化理論と機械学習

はじめに

機械学習技術は、ある「モデル」に基づきデータを用いて「何か」を機械的に学習する技術として定義することができる。その「何か」は対象とするモデルに応じて様々であるが、例えば観測データを近似する直線を求めるモデルでは、その直線の傾きに相当する。本稿ではその何かを「パラメータ」と呼ぶことにする。近年著しい発展を遂げている機械学習技術では、対象モデルに対して何らかの「目的関数」（先の例では観測データと近似直線の誤差の総和をパラメータにより表現した関数）を定義する。そして、「パラメータについての制約条件」の下で目的関数を最小化（または最大化）することで最適なパラメータ（先の例では傾き）を求める「最適化問題」へと帰着させる。そのような視点で、

“機械的にモデルを学習（機械学習）すること
≡ 最適化問題を定式化し最適解を求めること”

と言い直すことができる。実際、Google 社や Amazon 社等がしのぎを削る機械学習分野の最難関トップ会議で発表される研究論文の多くは、最適化問題や最適化手法に関連している。さて、パラメータが連続的に変化する連続最適化問題は、パラメータに「制約条件 C」が無い問題と制約条件 C がある問題とに分けられる。図 1(a)は、連続な実数値空間の全体がパラメータ (x,y) の範囲であるときに、目的関数 $f(x,y)=2x^2+6x+0.5y^2+4.5$ の最小値を求める「制約無し最適化」の様子を示している。この問題におけるパラメータの最適解 $(x,y)=(-1.5,0)$ は解析的に求めることができるが、このような解析的な解は一般の問題で

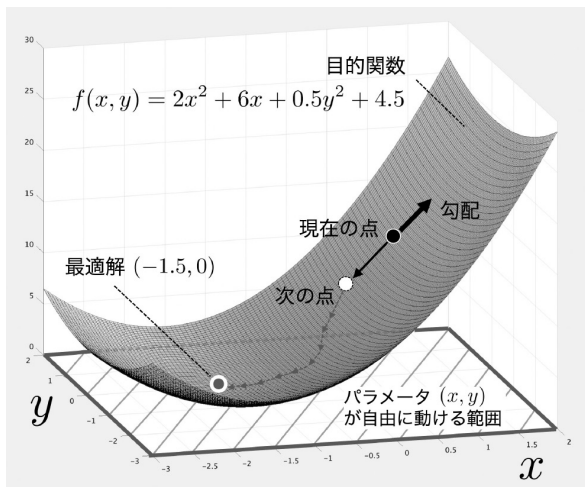
は存在しない。そのような問題では、目的関数の勾配情報（目的関数の傾き）等を用いた「反復勾配法」を利用することが一般的である。反復勾配法とは、同図に示すように、ある初期点から開始し、現在の点から勾配情報により定まる移動方向に伸びる半直線に沿って、点を反復的に更新していくことで最適解を求める手法である。一方図 1(b)は、パラメータ (x,y) が $x^2+y^2=1$ 上を動き回る「制約付き最適化」の様子を示している。この $x^2+y^2=1$ が制約条件 C に相当するが、このような問題で最適解を求めることは一般的に複雑になる。

本稿では、機械学習問題に現れるこのような連続最適化問題の中で、パラメータが「特殊な構造」制約条件 C（前述の $x^2+y^2=1$ 等）を有する制約付き問題を取り上げ、パラメータがリーマン多様体 M 構造（定義は後述する）を有する「リーマン多様体最適化問題」と、多面体 P 構造を有する問題の一つである「最適輸送問題」について紹介する。

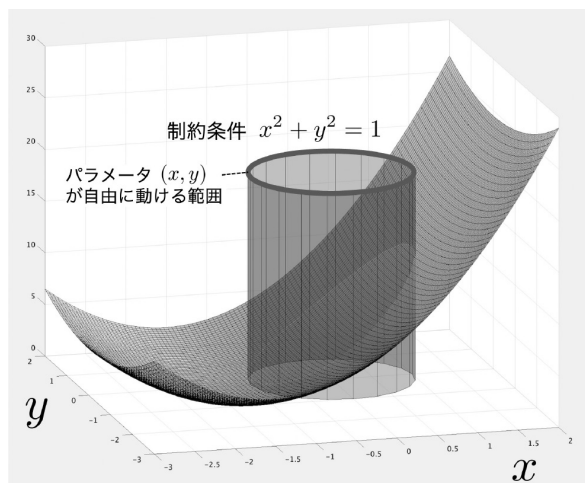
リーマン多様体最適化問題

❖リーマン多様体最適化とは [1]

制約条件 C の「内在的な性質」（例えば 3 次元内の地球を考えると、地球表面上からの視点では、地球表面が 2 次元的な性質を持つこと）に注目すると、制約付き問題を「制約条件 C 上の制約無し問題」と見なすことができる場合がある。特に制約条件 C が「リーマン多様体 M ($=C$)」のとき、ユークリッド空間（直交座標空間）上の制約無し連続最適化手法をリーマン多様体 M 上へ拡張した手法を用いることができる。ここでリーマン多様体 M を「局所的にはユークリッ



(a) 制約無し最適化問題



(b) 制約付き最適化問題

図1 制約無し最適化と制約付き最適化

「ド空間とみなせるような曲がった空間」と簡単に定義しておく。例えば、直交行列（列成分が互いに直交する行列）から成る空間（例えば3次元空間内の球体表面）等が含まれる。このアプローチは「リーマン多様体最適化」と呼ばれ、リーマン多様体 M が現れる様々な応用問題に適用される。例えば、データ解析や、映画の推薦、医療画像解析、異常映像解析、ロボットアーム制御、量子状態推定、高速無線通信制御、等が含まれる [2]。

リーマン多様体 M は一般に曲がった空間であることから、前記の反復勾配法と異なり、現在の点で初速度ベクトルが移動方向と一定するような「測地線」と呼ばれる曲がった直線（例えば、東京とロンドンを結ぶ地球表面上の最短曲線を想像してほしい）を考えて、それに沿って点を移動（測地線移動）していくことで最適解を求める（図2）。

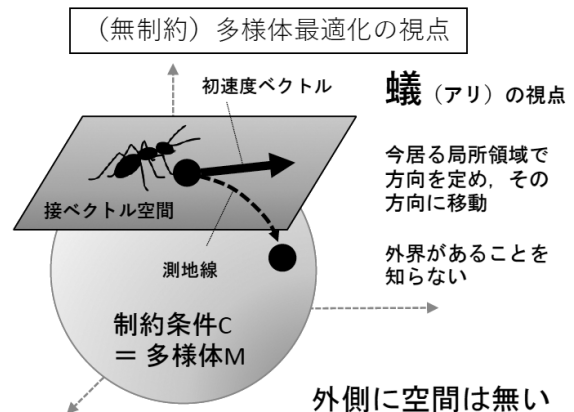


図2 リーマン多様体最適化の概念図

1970年代に本格化したリーマン多様体最適化の研究では、その当時より測地線計算等の高い計算量の問題が指摘されてきたが、現在においても、データ数や次元数の増加に伴いその問題はより顕著になっている。

❖リーマン多様体上の非厳密最適化手法

この問題に対して、近年、勾配情報や測地線等を近似的に求める手法が研究開発され著しい成果を上げている。ここでの新たな問題は、近似手法の最適解への収束性が保証されなくなってしまうことである。一般的に最適化理論の研究では、「着目する最適化手法が任意の点から開始しても収束するのか」、また「収束する場合でも各更新処理でどの程度の計算量が必要で、何回の更新回数で、最適解と比較してどの位の誤差を含む近似解まで到達できるか」等を理論的に明らかにすることが主要な研究対象である。この理論的結果は、最適化手法を搭載するシステムの設計に関係するため、最適化手法の利用者はこの点を考慮する必要がある。

上記の課題について、本研究室では「リーマン多様体上の非厳密最適化手法」を研究してきた。ここで「非厳密」とは、勾配情報やヘシアン情報（目的関数の曲がり具合）、測地線移動や平行移動（測地線に沿ったベクトルの移動）を近似的に計算することを指す。具体的な研究成果としては、反復勾配法と確率的勾配法（確率的に勾配を選択する勾配法の一つ）との結合法を提案し、非厳密な状況下でも停留点（勾配がゼロとなる点）へ高速に収束することを理論的に示した [3,4]。また、様々な非厳密最適化手法を提案し、それらの理論的収束レートを導出した [5,6]。これらの研究成果は最難関トップ会議や論文誌で世界に先駆けて発表され、それ以後のリーマン多様体上の非厳密最適化研究の参照手法となっている。

最適輸送問題

最適輸送問題は、確率分布間の距離を表現できる問題であり、様々なデータ間の「違い」を求めることができる。直感的には、確率分布の土塊を地点 A から地点 B へ運ぶ際の最適な輸送計画 T を求める問題として捉えることができる。ここで得られる最適な輸送計画 T により特徴づけられる距離は、近年、機械学習の分野で精力的に研究が進められている。この問題を定式化する上で注目すべきは、地点 A, B ともに条件として与えられた土塊量を満たす必要があるだけでなく、輸送に際して土塊の一部が地点 A に残る、地点 A で存在していた以上あるいは以下の土塊が地点 B に輸送される、ことは許容されない点にある（図 3 左）。本稿では、これらの条件を「質量保存条件 P」と呼ぶことにする。この最適化問題は、この質量保存条件を多面体制約条件 $P (=C)$ で記述した構造制約付き最適化問題として定式化される。

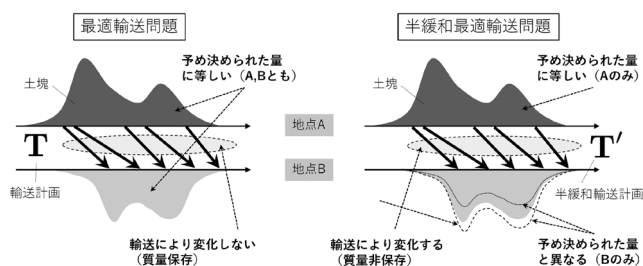


図3 最適輸送問題と半緩和最適輸送問題

❖緩和最適輸送問題と最適化手法

この最適輸送問題は、既存の線形計画問題（目的関数と制約条件 C が1次式で表現される最適化問題）用の最適化手法により解くことが可能であるが、その計算量はデータ次元の三乗に比例して増加する。そのため、高速な最適化手法が多数提案されており、特にエントロピー（情報の量を表す尺度）条件を追加した手法（シンクホーンアルゴリズムと呼ばれる）が広く注目を集めている。一方で、質量保存条件 P が厳密に満たされる必要が無い応用分野では、かえって性能劣化を引き起こすことが報告されている。このため、質量保存条件 P を緩めた「緩和最適輸送問題」が研究されている。

そこで本研究室では、質量保存条件 P の内、片方（地点 B 側）の条件のみ緩めた「半緩和最適輸送問題」（図 3 右）に対して、座標毎に勾配法を適用する高速化手法を提案し、その理論的収束レートを示した [7] さ

らに、前記のシンクホーンアルゴリズムによる半緩和問題についても研究してきた [8]。後者については、目的関数値の誤差および最適解に対する誤差に関する理論的収束レート解析を行い、最適輸送問題と比較して大幅な理論的性能向上を達成した。特に注目すべきは、質量保存条件 P の緩和問題において重要となる「質量保存誤差」についての収束レートを導出した点にある。この理論的成果により、アルゴリズムの停止時に、保存条件から質量がどれほど乖離しているかの最悪値を見積もることが可能となる。これにより、応用問題への適用時に質量保存条件 P の緩和の程度を調節することも可能となる。

❖グラフ問題への適用

前記の最適輸送問題は様々な機械学習問題へ応用されている。本稿では、研究室で進めている研究の中から「グラフ学習問題」への応用事例を紹介する。

グラフ構造データは、ノード情報とエッジ情報から構成され、SNS 上のユーザー間のつながり、化学物質等を表現することが可能である。例えば、化学物質をグラフ構造データで表現し、そのデータ間の距離を定義することで、構造的に近い化学物質を発見でき創薬開発に寄与できる。さて、深層学習モデルはグラフ構造データには直接適用できないことから、グラフニューラルネットワーク（Graph Neural Network : GNN）が注目されている。グラフ学習分野には、ノード分類、エッジ予測、グラフ分類の代表的なタスクがあるが、GNN は前者2つのタスクについて優れた性能を示すことが知られている。一方で、グラフ分類タスクについては、従来法よりも不安定で精度が低いことが報告されている。

このような背景を受けて、本研究室ではグラフ構造データ間の距離を最適輸送問題により定義する研究を行ってきた。最初に、グラフ上の探索手法から得られる走査パス比較手法の改良に基づくグラフ間距離を提案した。具体的には、ノードとエッジから構成される系列の共通集合（Longest common sequence : LCS）を用いて最短パスを比較する手法を定義し、従来手法では不可能であった柔軟なパス間比較を実現した。そして、このように得られるパスの集合を離散確率分布と見なし、LCS 間の非類似性を基底距離とする最適輸送問題を定義した。グラフ分類精度の数値実験から、提案手法が従来のカーネル法（パターン認識手法の一つ）と同等以上の性能を持つことを示した。

次に、微小な構造変化（ノードやエッジの挿入・削除・置換等）で経路が大きく変動する従来のグラフ探索手

法の問題に着目し、安定した方法でグラフ構造を記述する手法を提案した。具体的には、グラフカーネル分野で最も代表的な Weisfeiler-Lehman (WL) (グラフ構造の一致性を判定する手法) に着目し、その解釈に用いる WL の部分木の概念をノード周辺の構造情報に適用した。WL 部分木間の木編集距離 (木 A のノードとエッジを挿入・削除・置換の3つの操作で木 B に変換するための操作数) を計算することでノード間の距離を定義した。また、高速に計算可能な近似距離を提案し、その高速アルゴリズムと理論的保証を与えた。さらに、提案した木編集距離を基底距離とする最適輸送問題を提案した。数値実験では、2つの同一グラフの一方だけにノイズを加えた際のグラフ間距離の挙動を評価した。その結果、従来手法では微小な構造変化に対して急激な増加が見られるのに対して、提案手法では全体的に滑らかな増加曲線を示すことを確認

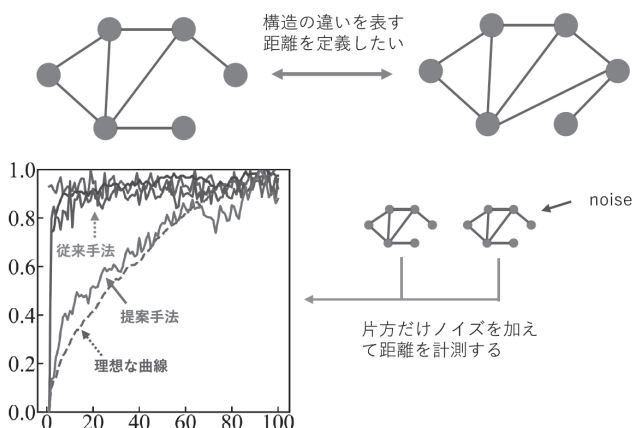


図4 WL部分木を用いた手法の距離識別性能

し、提案方式がグラフ構造の微小変化をグラフ間距離として効率的に表現可能であることを示した (図4)。またグラフ分類精度の数値実験からも、提案手法が最先端のグラフカーネル手法と同等以上であることを示した。

終わりに

構造制約付き最適化問題は実世界の様々な応用問題に現れるが、最先端の深層学習により効率的に扱うことが困難な問題領域の一つである。これらの問題に適したより優れた最適化手法を開発するとともに、その特性を理論的また数値的に評価していくことは意義がある。研究室ではその発展の一端を担えるよう研究を進めていく。

<参考文献>

- [1] 佐藤 寛之, 笠井 裕之, リーマン多様体上の最適化の基本と最新動向, システム制御情報学会学会誌「システム/制御/情報」, 62巻1号, pp.21-27, 2018.
- [2] H.Kasai and B.Mishra, "Low-rank tensor completion: a Riemannian manifold preconditioning approach," ICML, 2016.
- [3] H.Sato, H.Kasai and B.Mishra, "Riemannian stochastic variance reduced gradient algorithm with retraction and vector transport," SIAM Optimization, 2019.
- [4] H.Kasai, H.Sato, and B.Mishra, "Riemannian stochastic recursive gradient algorithm," ICML, 2018.
- [5] H.Kasai and B.Mishra, "Inexact trust-region algorithm on Riemannian manifolds," NeurIPS, 2018.
- [6] H.Kasai, P.Jawanpuria, and B.Mishra, "Riemannian adaptive stochastic gradient algorithms on matrix manifolds," ICML, 2019.
- [7] T.Fukunaga and H.Kasai, "Block-coordinate Frank-Wolfe algorithm and convergence analysis for semi-relaxed OT problem," ICASSP, 2022.
- [8] J.Huang, Z.Fang and H.Kasai, "LCS graph kernel based on Wasserstein distance in longest common subsequence metric space," Signal Processing, 2021.
- [9] Z.Fang, J.Huang, X.Su, and H.Kasai "Wasserstein graph distance based on L1-approximated tree edit Distance between Weisfeiler-Lehman subtrees," arXiv preprint arXiv:2207.04216, 2022.

基幹理工学部情報通信学科 笠井研究室

早稲田大学基幹理工学部情報通信学科笠井研究室は、2019年9月に設立した比較的新しい研究室です。現在、博士後期課程学生から学部4年生まで16名の学生が在籍しています。研究室では、最適化理論、機械学習、信号処理の理論と応用に関する研究活動に取り組んでいます。最適化・学習のためのアルゴリズムの開発とその評価、最適化・学習モデルの構築、またアプリケーションへの適用について、数値実験と理論的解析の両面からアプローチしています。特定の応用やアプリケーションにおける性能向上に加えて、研究成果を一般原理や理論に昇華させることを目標に据え、研究活動に取り組んでいます。

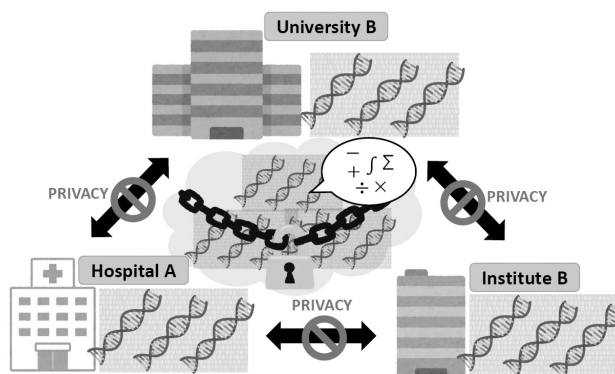
<http://kasai.comm.waseda.ac.jp/>



機械学習分野の最難関トップ会議 ICML2019にて
共同研究者と記念写真 (著者最左)

ヒトゲノムデータの活用を促進する 秘密計算技術

近年、国内外の医療機関や研究組織においてヒトゲノムデータの蓄積が進んでいる。分析精度の観点では、各所に散らばるデータを集めて分析することが望ましいが、ゲノムは個人と強く結びつく情報であることから、組織をまたぐデータ共有が難しい。我々の研究室ではこの問題を解決すべく、秘密計算技術によりヒトゲノムデータを暗号化したまま解析する方法を研究している。本稿ではその取り組みの一部を紹介する。



共有の難しいヒトゲノムデータを秘密計算により分析

早稲田大学
理工学術院基幹理工学部情報理工学科情報理工・情報通信専攻
国際情報通信研究センター
教授 清水 佳奈

増大するヒトゲノムデータ

生物の遺伝情報はDNA*1を構成する塩基の並びで表現されている。それぞれの塩基を文字とみなすと、遺伝情報は文字列とみなせる。この文字列はゲノム配列とよばれ、ヒトであれば30億文字ほどの長さとなる。ゲノム配列は生物種が同じであれば似たような文字列となるが、個体ごとに少し違いがある。この違いは変異と呼ばれ、ときに個体の特徴の差を生み出す。長いゲノム配列上のどの変異がどのような特徴に結びついているのか、その全容はまだ解明されていないが、これまでの研究により、乳ガンやアルツハイマー病などの疾患や外見上の特徴と強く関連する変異が特定されている。

今から十年ほど前までDNAからゲノム配列を読み取るには莫大な費用が必要であった。図1をご覧頂きたい。こちらは、ヒト一人分の全ゲノム配列を計測する費用の推移を示している。2001年時点では一億ドルが必要であったが、2000年代後半から急激な費用の下落が見られる。実は、この頃にゲノム配列の計測技術が格段に向上し、新型の計測装置が次々と開発された経緯がある。その恩恵を受けて、現在は1000ドル以下の費用で個人の全ゲノム配列を計測することができるようになったのである。

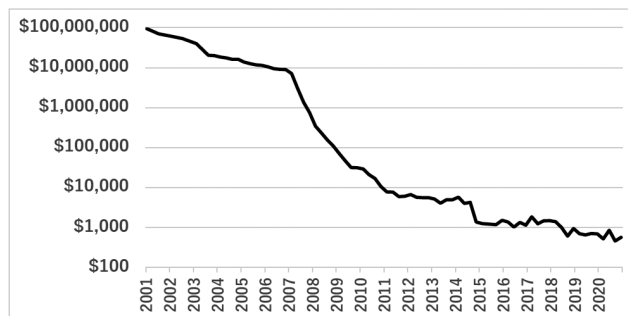


図1 ヒト一人分の全ゲノム配列を計測する費用の推移
(アメリカ国立衛生研究所による試算[1])

ヒトゲノムの特殊性

さて、このような歴史的な技術革新によって顕在化したのがプライバシーの問題であった。ゲノム配列は個人ごとに異なるため、個人を識別可能なIDとみなすことができってしまう。一方で、マイナンバー等の一般的な個人情報と大きく違うのは、個人の性質を説明する情報も保有している点である。さらに、遺伝情報がゆえに血縁者で文字の並びが似通うという複雑な問題まではらんでいる。このようなことから、ゲノム配列の開示には多くのリスクが伴うことが指摘されている。そのリスクを具体的に想像しやすいように、関連するニュースを一つ紹介したい。2018年に北米で40年以上未解決であった連続殺人事件の犯人が逮捕されたことが大きな話題となった。実は、この迷宮入り事

*1DNAはヌクレオチドと呼ばれる物質が鎖状に連なった物質だがヌクレオチドに含まれる塩基は4種類ある

件を解決に導いたのはインターネット上の家系図サービスであった。北米では民間企業によるゲノム配列の計測サービスが盛んであり、計測された個人のゲノム配列が家系図としてデータベース化されることがある。検察は犯行現場に残されていた犯人のDNAからゲノム配列を取得し、家系図の検索によって犯人の親族を特定して、捜査範囲を絞りこむことができたという。ここ数年、北米では類似の捜査方法により多くの犯罪者が検挙されている。このニュースは、ゲノム配列の活用と解釈することもできるが、仮にこれが犯罪者ではなく、一般市民のゲノム配列だったとすると、様々なことが懸念されるのは容易に想像がつくだろう。また、人物の特定のみならず、ゲノム配列そのものからも疾患リスクや外見上の特徴などが得られる可能性があることにも注意が必要である。

プライバシー保護データマイニング

ゲノム配列の扱いにはプライバシー保護の必要性があることから、組織をまたぐデータ共有が難しい。現状では法整備を含むポリシー策定によってデータ共有を進めることが試みられているが、様々な組織の都合を考慮した利害調整は容易ではない上、本質的な解決策とはならない。このような状況を打開する技術として、データの中身を見ないまま分析結果のみを得るプライバシー保護データマイニングに期待が寄せられている。プライバシー保護データマイニングを実現する具体的な技術としては、データを暗号化したまま演算を行う秘密計算や公開したいデータに対して統計量に基づいたノイズを加えて個別のデータの推定を防ぐ差分プライバシー法などがある。また関連する話題としては、ハードウェア上に隔離空間を作ってプログラムを安全に実行するTrusted Execution Environmentも研究開発が進んでいる。これらの技術を用いてできることの例を図2に示す。例では、従業員の給与総額を求めることを考えている。通常であれば、個々人の給与額を参照する必要があるが、個別の給与額を参照せずに総額のみを計算することができるのである。プライバシー保護データマイニングの研究はここ十年ほどで大きく進展し、給与計算のような簡単な問題だけではなく、複雑な検索問題や機械学習（いわゆる人工知能技術）への応用も研究されるようになってきている。紙面の都合上、本稿では紹介しないが、我々の研究室においても、化合物の構造を隠しながら類似度を計算する手法[2]や、入力を隠したまま決定木を評価する手法[3]などを開発している。前者は、製薬企業等の利害関係にある

(通常の計算の場合)
値を見て計算



(PPDMの場合)
値を見ないで計算



図2 プライバシー保護データマイニングの例

二者が互いのデータベースを秘匿したまま、開発目標の競合を確認する等に応用することができる。後者は、患者の臨床情報を隠したままクラウド上で診断を行う応用などが考えられる。

秘密分散法

秘密分散法とは秘密計算の手法の一つであり、秘密の値を複数のパーティー（秘密計算に参加する計算ノード）に分割して値を守りながら目的とする計算を行う方法である。ここでは、簡単な例として三名の給与の総額を計算する方法を説明する。この計算には、給与額を入力するAさん、Bさん、Cさんと、二台の計算ノードが関与する。Aさんは自分の給与額10万円を二つの値に分割する。この際、分割した値の合計が10万円となり、また、分割した値は乱数に見えるようにする。具体的には、まず初めに乱数 r_a を適当に決め、 $100000 - r_a$ を計算すればよい。（実際には、平文の上限 n を決めて、 $100000 - r_a \pmod{n}$ を計算する。）分割した値はシェアと呼ぶ。Aさんはシェアを二台の計算ノードそれぞれに送る。ここで計算ノードの視点に立ってみるとどうだろうか。 r_a は乱数なので、Aさんの給与額とは相関しない。また、 $100000 - r_a$ についても r_a が作用しているおかげでAさんの給与額とは相関しない。したがって、計算ノードはAさんの給与額を知ることはできない。ただし、この計算では二台の計算ノード同士が共謀してシェアを共有してしまうことは想定しない。（共謀すればAさんの給与額は復元されてしまう。）同様に、BさんとCさんもそれぞれの給与額5万円と12万円を乱数 r_b, r_c によってシェアに分割し、それぞれ計算ノードに送る。ここで片方の計算ノードが $r_a + r_b + r_c$ を計算し、もう片方が $(100000 - r_a) + (50000 - r_b) + (120000 - r_c)$ を計算する。そして、計算した結果を全員に開示してみよう。開示された値を加算すると、 $r_a + r_b + r_c + (100000 - r_a) +$

$(50000 - r_b) + (120000 - r_c)$ となり、給与の総額である $10000 + 50000 + 120000 = 270000$ を計算することができる。計算ノードが開示した値からは、個々の給与額が漏れないことに注意してほしい。

このように、秘密分散法を用いると値の中身を隠したまま演算結果を計算することができる。上記の例では足し算を計算したが、もう少し複雑な値のやり取りをすると、掛け算や割り算も計算することができる。コンピュータ上で行われる処理はすべて足し算と掛け算の組み合わせで記述することができる。そのため、通常の足し算とかけ算を、秘密分散法による「安全な」足し算と掛け算に置き換えることによって、あらゆる処理を秘密に実行することができる。

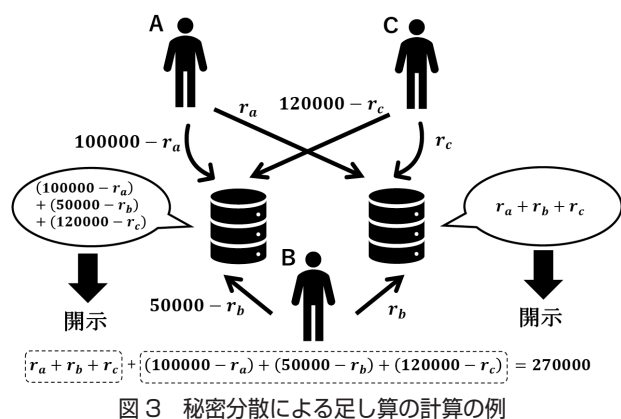


図3 秘密分散による足し算の計算の例

秘匿ゲノム配列検索

我々の研究室では、生命情報を安全に解析する方法を研究しているが、本稿ではそれらのうち、秘密分散法に基づくゲノム配列検索 [4] について紹介したい。ヒトゲノムデータの分析では、ゲノム配列のパターン照合が非常に重要であり、パターンの照合を足掛かりとして、疾患要因の特定などの分析が可能となる。ここでは、ユーザーが特定のゲノム配列を持っており、データベースに格納されているたくさんのゲノム配列の中から類似する配列を検索する問題を考える。例えば、ユーザーは患者のゲノム配列の一部を持っており、データベースには特定の疾患と関連するゲノム配列が多数収められており、配列の類似度に基づき患者の疾患リスクを分析するなどの応用が想定される。この時、ユーザーのゲノム配列は患者のプライバシーに影響するため、また、データベースに格納されているゲノム配列はデータ提供者のプライバシーに影響するため、互いのゲノム配列を隠したまま検索を行いたい。それでは、提案手法の概要を図4に示す。まず、ゲノム配列を格

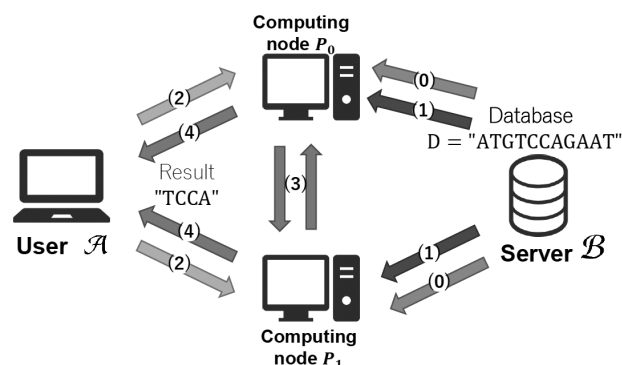


図4 秘匿ゲノム配列検索のモデル

納したデータベースをシェアに分割して計算ノードに配置する。そして、ユーザーはクエリ（検索に用いるゲノム配列）をシェアに分割して計算ノードに配置する。計算ノードはデータベース、クエリの中身がわからないまま秘密計算を行い、検索結果のみをユーザーに返す。

ところで、前章の説明では、あたかも秘密分散により何でも秘密に計算できるかのような印象を与えたかもしれない。しかし、実際には何らかの分析を秘密計算によって実現しようとすると、長い計算時間が必要となる。先ほどの足し算の例では通常の計算と比べて余分な計算はあまり発生しない。しかし、掛け算を行う場合は、より多くの計算が必要となることに加え、計算ノード間でのシェアの交換、つまり通信が必要となる。分析の過程で通信が必要となると通信遅延に応じて計算完了までの時間が大幅に長引く。このため、データ分析の方法をうまく工夫して、なるべく通信が発生しないように巧妙なアルゴリズムを設計する必要がある。詳細は割愛するが、提案手法では、特殊なシェアの作り方をすることに加え、簡潔データ構造と呼ばれるデータ構造を用いることにより、計算ノード間で発生する通信の回数や通信量を大幅に削減することに成功した。一般的な構成方法がデータベースの大きさに比例する計算時間が必要であるのに対して、提案手法では、データベースの大きさに比例しない計算時間を実現している。図5に提案手法 (Secure LPM/Secure LMEM) と従来手法 (Baseline LPM/Baseline LMEM) の比較を示す。ゲノムデータベースのような大きなデータベースの場合は、数百～数万倍もの高速化が達成された。

提案手法では特殊なシェアの作り方をすると述べたが、このシェアを利用すると、配列上のある要素を参照し、その参照結果をもとにあらたに配列上の別の要素を参照する、といった再帰的な配列の参照が可能に

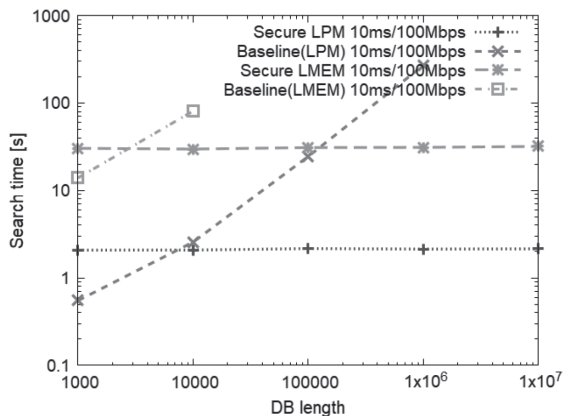


図5 提案法の計算時間

なる。実は、このようなデータへのアクセスの仕方は、本稿で紹介したゲノム配列検索の他にも、一般的な文字列や時系列データのパターンの照合、さらに、グラフや木構造といった基本的なデータ構造を基礎としたパターンの照合などにも応用することができるため、様々なデータの秘匿検索を効率化することが期待できる。

おわりに

秘密計算は発展途上にあり、ヒトゲノムデータの実解析に適用するには、更なる高速化や適用部分の絞り込みが必要となる。本稿では秘密分散法に基づく方法を紹介したが、Oblivious RAM^{*2}を併用する方法や、準同型暗号^{*3}及びGarbled Circuit^{*4}による研究も近年発展が著しい。各要素技術には利点と欠点があるため、こういった技術を目的に合わせて適切に用いていくことにより、秘密計算が実社会に役立つものとなると期待している。

^{*2} データへのアクセスパターンを秘匿化する方法

^{*3} 暗号文のまま演算を行うことのできる暗号方式。加法準同型暗号のように特定の演算のみ可能となる方式や、完全準同型暗号のように足し算と掛け算の両方に対応した方式がある。

^{*4} 論理回路への入力を秘密にしたまま結果を計算する方法

<参考文献>

- [1]<https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>
- [2]K Shimizu, et.al., BMC bioinformatics 16 (18), 1-14
- [3]H Sudo, K Nuida, K Shimizu
International Conference on Information Security and Cryptology, 143-160
- [4]Y Nakagawa, S Ohata, K Shimizu
Algorithms for Molecular Biology 17 (1), 1-22

基幹理工学部情報理工学科情報理工・情報通信専攻 清水研究室

清水研究室では、生命情報のデータ解析に必要な新技術の開発に取り組んでいます。さて、生命科学に関する研究というと、白衣の研究者がフラスコやピーカーを片手に顕微鏡を覗き込む姿を思い浮かべる方が多いのではないのでしょうか？実は、現代の生命科学では、実験と同じくらいデータ解析の重要性が高まっています。我々の分野では、実験の研究を“ウェット”、データ解析（あるいは解析法）の研究を“ドライ”と呼ぶのですが、かつては、ウェットのお手伝い程度に思われていたドライの研究が、今では主役とも呼べるほど存在感を増しています。その背景にあるのは、様々な計測装置における技術革新です。本稿の冒頭でも紹介したように、かつては莫大な予算がなければ手に入らなかったヒトゲノム配列が、今では夏休みのアルバイト程度の金額で簡単に手に入るようになりました。このような中、膨大なデータから科学的に価値のある情報を素早く正確に見出すことが非常に重要になってきています。我々はこれまでに、ゲノム配列やタンパク質のアミノ酸配列から有用な情報を発見するためのアルゴリズムの開発を開発してきました。最近の成果では、多数のゲノム配列を集約してグラフ構造として保存する際に、集約により失われてしまう情報を大幅に抑制する方法を開発しました。このような研究に加えて、生命情報を安全に分析する方法の研究にも取り組んでいます。

本稿で紹介した秘密計算技術もその一つに含まれます。生命科学ではデータの量と種類が増大しており、扱わねばならないテーマもどんどん広がっています。我々は、これらのデータを科学の知見に還元すべく、日々、研究に精進してまいります。

<https://www.cbio.cs.waseda.ac.jp>



研究室での集合写真（筆者前列右から4番目）

編集後記

■早稲田大学は、村上春樹氏、吉永小百合女史をはじめとする著名な卒業生がいる一方、音楽学部がないのに小室哲哉氏、ゴスペラーズ、デーモン小暮（相撲評論家？）、医学部がないのに稲門医師会（＝OB会）があり、卒業生が多彩だ。歴史的に国家官僚志向の東京大学、時代の斬新さと富裕層イメージの慶應義塾大学とは敢えて距離を保ち、主流ではない亜流での在野精神という文化土壌は、人はパンのみにて生きるにあらずという貧乏苦学でも志を持つ重要さと生きていく強さを伝えている。段差・坂道や河岸段丘など、お金にならない知の探求は、この国の公共放送週末ゴールデンタイムにエンタメ番組としてしっかり収まっている自然体として訴求できる。

現在日本のICT牽引企業TOPのNTTの川添氏、篠原氏、KDDI総合研究所の中島氏、中村氏も同大学の理工学部OBだ。オフコースの小田和正氏もここでも建築学を学び、カルト宗教のJ氏も同キャンパスに通っていた。入学時から振れ幅の大きい多彩なボラティリティという懐の深さがあるのだろう。門の無い学校として、門戸開放、機会均衡、来るもの拒まず、去る者追わずか、タモリ、五木寛之氏、永六輔氏、大橋巨泉氏、橋田壽賀子女史、森繁久彌氏など、大学の枠に収まらないのか、在学途中で自分から学校を離れ去り、外に出て行った方が出世するという伝説がこの大学には存在する。

ところで、本特集内容は、政府が提唱するSociety5.0に直球するICTアプローチというより、理工学術にも顕在する多角的アプローチを示すオルタナティブな基盤研究の集大成となった。新たな側面からのICTアプローチには、外国人留学生も多く参画し、門の無い大学として、日常的なボーダレスが“何処よりも”先行し、そのオープンさと裾野の広さが感じ取れる。（○十年前、4年で卒業（汗；）の“杉のお山”）

■湘南に引っ越して丸2年。コロナ禍で地元のお祭りはすべて中止でしたが、今年の夏から規模は縮小されつつも、少しずつ開催されはじめました。ただ、どこで、いつ、どんなお祭りがあるのかが分からず、道路の交通規制の案内板を見て知ったり、突然屋台が立ち並び、笛や太鼓の音がか聞こえてくるので急いで駆けつける…なんてこともありました。その中で一番印象に残っているお祭りが、9月に3日間にわたり行われた「龍口法難会」です。

龍口法難会とは日蓮聖人が幕府の迫害を受け、1271年9月12日、片瀬龍口*において斬首されようとした時、奇瑞が現われて難を免れたことを記念する法会です。日蓮聖人が龍ノ口刑場へと護送される時、棧敷の尼が「ゴマ入りのぼたもち」を捧げたところ、奇跡的に処刑を免れたという伝説が残されており、法要後に「難除けぼた餅」が振舞われる事から「ぼた餅供養」とも呼ばれています。

当日、勝手がわからないまま本堂へ行くと「これから法要ですからどうぞお入りください。」と本堂内に案内され着席。ちゃっかりぼたもち供養大法要に参加し、ぼた餅を頂くことができました♪

暗くなると纏のパフォーマンスが始まり、最後に華やかな万灯が奉安されます。例年、万灯数十基、参詣者数10万人が集まる湘南地域最大の賑わいになるそう。規模を縮小した今年でもかなりの人出でだったので、例年並みのお祭りになったらと思うと今から鳥肌がたちます。ちなみにぼた餅は、本来本堂からばら撒くそうですが、感染予防のため今年は手渡し。このぼた餅の取り合いが、人間の業の全てがココにあるという具合で凄いらしいです（笑）。コロナが落ち着いてもぼた餅は是非とも手渡しでお願いしたいところ。（みんな）

*現在の神奈川県藤沢市片瀬

2022 11 No.349 電波技術協会報

フォルン
Future
Of
Radio
Network
FORN

No.349 / 2022年11月10日発行

発行 一般財団法人 電波技術協会

発行人 矢橋 隆

編集 FORN 編集担当（杉山 博、松浦 美恵）

本部

〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-3 アーシスビル 9F

TEL 044-965-1200 FAX 044-965-1222

新百合ヶ丘事業所

〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-12-6 京野ビル

TEL 044-951-0111 FAX 044-951-0201

ホームページアドレス <https://reea.or.jp/>

印刷所 株式会社真興社

禁無断転載

送付先変更のご連絡やお寄せいただくご意見・ご感想は、
下記の弊協会HPの「お問い合わせ」ページ、またはFAX
にてお知らせください。

URL : <https://reea.or.jp/contact/>
FAX : 044-965-1222

Reea
Radio Engineering &
Electronics Association