

# 電波技術協会報

2021 5  
No.340

フォルン  
Future  
Of  
Radio  
Network  
FORN



## 特集： 慶應義塾大学テクノストラテジー

連載記事ほか

Reea

Radio Engineering & Electronics Association

# 電波技術協会報 F<sup>ォルン</sup>ORN 2021 5 No.340

Future Of Radio Network

特集:慶應義塾大学テクノストラテジー

- 2 慶應義塾先端科学技術研究センターと慶應科学技術展  
慶應義塾大学 津田 裕之
- 6 社会を変えるデータスマートシティ  
慶應義塾大学 西 宏章
- 10 リアルタイムなデータを活用した5G時代のエッジコンピューティング  
慶應義塾大学 山中 直明
- 14 5G時代のスマートヘルスケア  
慶應義塾大学 大槻 知明
- 18 サイバー・フィジカル・ソーシャルシステム(CPSS)のネットワーク化制御  
慶應義塾大学 久保 亮吾
- 22 AIを活用した手術動画の記録と解析  
慶應義塾大学 斎藤 英雄
- 26 ネットワーク身体拡張のためのAIハンドインタフェース  
慶應義塾大学 桂 誠一郎
- 30 医療・ヘルスケア・コミュニケーションの理工学  
慶應義塾大学 三木 則尚
- 34 AIやICTを活用した精神医学イノベーション  
慶應義塾大学 岸本 泰士郎

Close-up

- 38 電波研究の玉手箱<6>  
電気通信大学名誉教授 唐沢 好男
- 42 地上ICTに役立つ「宇宙天気予報」<6>  
国立研究開発法人情報通信研究機構

放送歴史 / 通信史書

- 46 星を見上げるラジオ少年 <2>  
国立研究開発法人情報通信研究機構 理事 門脇 直人

デジタルな法律相談ちゃんねる

- 50 異国に存在する私の現住所  
弁護士 杉本 隼与

各界だより

- 52 総務省、REEA ほか

【表紙の写真】

最右上:慶應義塾大学三田キャンパス図書館旧館(重要文化財)、  
最左上から右下へ:慶應義塾大学日吉キャンパス(奥)と理工学部  
がある矢上キャンパス(手前)の空撮画像、矢上キャンパス創想館、  
理工学部山中研究室スマートグリッドの制御実験風景2点  
(掲載協力:慶應義塾大学理工学部)

# 慶應義塾先端科学技術研究センターと 慶應科学技術展

慶應義塾大学理工学部において、研究活動を先導し、産学連携を推進する先端科学技術研究センターの紹介、KEIO TECHNO-MALL（慶應科学技術展）2020 の開催報告、産学連携事例の紹介を行う。



KEIO TECHNO-MALL 2019 開催風景



KEIO TECHNOMALL 2020  
オンライン開催スタジオ風景

慶應義塾大学理工学部 先端科学研究センター 副所長  
慶應義塾大学テクノモール実行委員長  
津田 裕之

## はじめに

慶應義塾大学理工学部は、私立理工学部の雄として産学連携に基づくイノベーション推進に古くから取り組んできた。2000年に先端科学技術研究センター（KLL：Keio Leading-edge Laboratory of Science and Technology）を成立し、戦略的に産学連携を進めるとともに、2015年には（株）慶應イノベーション・イニシアティブ（KII：Keio Innovation Initiative, Inc.）というベンチャーキャピタルを設立し、さらに2018年には慶應義塾大学イノベーション推進本部の設置等、次々と施策を行ってきた。KEIO TECHNO-MALL（慶應科学技術展）2020は、当開催が21回目となる大規模イベントであり、特に今回は初めて医学部が共同主催している。国内では最も歴史のある、最大級の大学発の理工系エキシビジョン・シンポジウムであり、毎年100を超えるブース、2000名以上の来場者を集めている。今回はCOVID-19の影響によりオンラインで開催するとともに、TECHNO-MALLの直前には5回に渡りPre- KEIO TECHNO-MALL 2020セミナーシリーズを開催した。本稿特集ではTECHNO-MALLと本塾理工学部における産学連携の取り組みについて述べる。

## 先端科学技術研究センター

KLLは図1に示すように三つの組織から構成されている。リエゾン推進委員会は、まさに広報や本稿で紹介するTECHNO-MALLを通じて産業界との連携

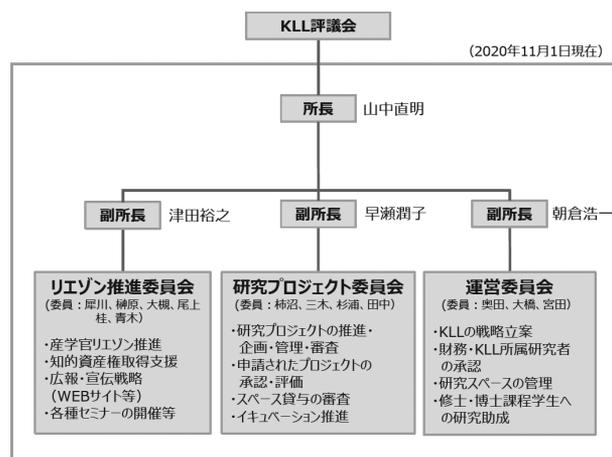


図1 KLLの組織

を図るものである。研究プロジェクト委員会は連携研究を行うための実験室の提供、新しい研究や産学連携を生むプロジェクトの企画・推進、ベンチャーインキュベーションを行っている。運営委員会では、研究開発と産学連携戦略を常に検討している。また、KLLは人材育成という大切なミッションを持っており、特に大学院教育を推進している。

図2は、現在の大学における産学連携の姿である。大学はすでに研究と教育だけではなく、社会貢献がミッションである。社会貢献とはもちろん人材育成を含むが、現在の日本社会の根底である競争力の向上が重要なミッションである。例えば、慶應義塾は外部からの研究資金受け入れにおいて、国内大学では極めて

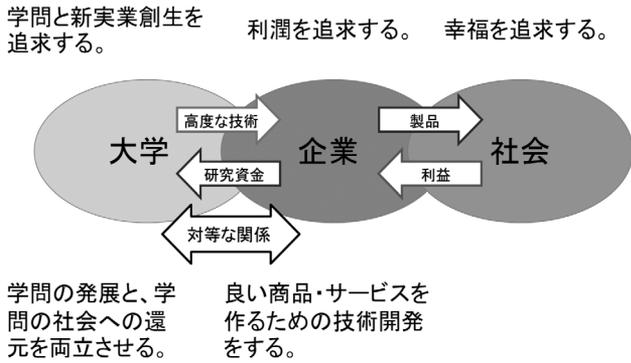


図2 産学連携の目指す姿

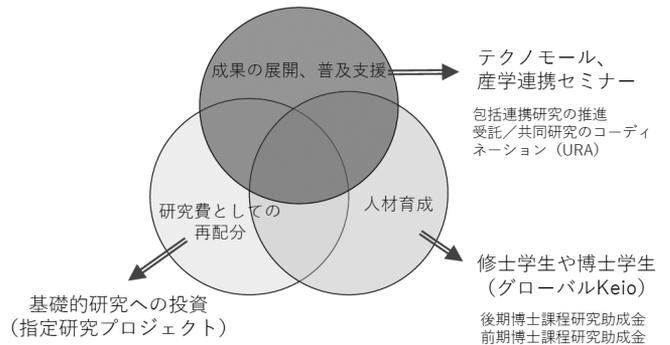


図3 KLLの資金投資のポートフォリオ

優良な方ではあるが、米国の一流大学の1/100という現状である。外部研究資金の不足は日本の大学の研究競争力に大きく影響する。これは日本においては、研究を大学に期待するものが少ない（ミッションが少ない）という部分もあるのではないかと反省がある。さらにベンチャー（スタートアップ）設立は、先進国の中で後塵を拝しており、これも大きな問題である。これは、日本には技術がなくスタートアップできるものがないのではない。スタートアップには、キーとなるテクノロジーだけでなく様々なノウハウも必要である。そのためのアントレプレナー教育やメンター制度、支援やファンドといったシステムが必須であり、整備に努力している。もちろん共同研究により社会実装を行うときことも大切である。大学の教員は手を汚して実用化へのサポートまで行い、また企業の方は大学の研究者を「安い労働力」とは考えず「知」のパートナーとして活用してほしい。

KLLは産業界からの共同研究の受け入れ窓口でもある。共同研究費の一部は間接費として大学の貴重な戦略的資金となる。図3に示すように、その資金をKLLでは三つのポートフォリオを組んで活用している。

一つは産学連携をさらに進めるための再投資である。TECHNO-MALLや産学連携セミナーは、これの代表的な活動である。一方、基礎研究は、厳しい競争にさらされている企業よりも大学が大きなミッションを持っていることは言うまでもない。例えば国の基礎研究費は減少もしくは国際的には低水準となってしまっている。そのため、KLLでは基礎研究に対して戦略的に資金の再配分を行っている。この中には、企業と大学のマッチングファンドもあり、意外かもしれないが企業だけではなく大学も研究開発費の負担を行っている。最後のポートフォリオは人材育成、つまり学生である。KLLでは博士の研究費と同時に「修

士の学生は全員海外に行くチャンスを与えよう」という考えで、積極的に海外発表等を支援し多くの経験をさせている。

## KEIO TECHNO-MALL 2020

例年、KEIO TECHNO-MALLは、東京国際フォーラムで開催しているが、今回は、COVID-19の感染状況から対面での開催を断念して、オンラインで開催した。これに先立つPre-KEIO TECHNO-MALL 2020セミナーシリーズでは、図4に示すように、特定のテーマに絞った内容として、関連する教員の研究紹介と参加者との交流を図った。講演の大半をアーカイブして、しばらくの間、視聴できるようにしている。（[http://www.kll.keio.ac.jp/ktm/pre\\_event.html](http://www.kll.keio.ac.jp/ktm/pre_event.html)）

リアルタイム参加者が100人を超えることもあり、特定のテーマであることから、質疑も活発であり、発表後のブレイクアウトルームでの講演者と参加者との個別の議論も十分に行うことが出来た。また、第4回のセミナーでは、時差の課題はあるものの、同時通訳を交えて海外の研究者も参加した。容易にワールドワイドで議論できることもオンライン開催の利点である。

メインイベントであるTECHNO-MALLは、慶應義塾大学矢上キャンパス内に臨時のスタジオを設置し、リアルタイムでのパネルディスカッションを行い、各教員の仮想ブースでは、リアルタイムでの教員との質疑を可能とした。80件の仮想ブースを設けたが、その中の10件は、今回から共同主催となった医学部関連のブースである。また、TECHNO-MALLをアーカイブ化して、いつでも視聴可能としている。（<http://www.kll.keio.ac.jp/ktm/index.html>）

例年、シンポジウムは、ホットなテーマを選択し、著名な講演者を招くことから人気が出て会場に入れない参加者が出てくるが、オンラインで人数制限が無い

Pre- KEIO TECHNO-MALL 2020 セミナーシリーズ	
第1回	「今から始まる5G時代の技術とビジネス」 2020年10月7日(水) 15:00~18:00 <講演者> 理工学部 電気情報工学科 教授 真田 幸俊 理工学部 情報工学科 教授 大槻 知明 理工学部 情報工学科 教授 山中 直明
第2回	「社会に向けた理工学部の医工連携」 2020年10月22日(木) 15:00~17:30 <講演者> 理工学部 機械工学科 教授 竹村 研治郎 理工学部 生命情報学科 准教授 牛場 潤一 理工学部 電気情報工学科 教授 青木 義満
第3回	「最先端フォトニクスと産業応用」 2020年11月4日(水) 10:00~12:15 <講演者> 理工学部 電気情報工学科 教授 津田 裕之 理工学部 物理情報工学科 准教授 牧 英之 理工学部 電気情報工学科 教授 田邊 孝純 理工学部 物理情報工学科 教授 石橋 崇明
第4回	「デジタル化社会のものづくり革命」 2020年11月12日(木) 15:00~18:00 Prof. Seichiro Katsura, Keio University Prof. Yasuhiro Kakinuma, Keio University Dr. Kazumasa Miura, RWTH Aachen University Dr.-Ing. Matthias Brockmann, RWTH Aachen University Mr. Amir Shahidi, RWTH Aachen University Mr. Andres Posada, RWTH Aachen University
第5回	「産学連携が作る新しいコロナ後の社会」 2020年12月1日(火) 15:00~18:00 <講演者> 経済学部 教授 駒村 康平 イノベーション推進本部 特任教授 杉山 直人 医学部 整形外科学教室 教授 中村 雅也 理工学部 情報工学科 教授 山中 直明

図4 Pre- KEIO TECHNO-MALL 2020

ため、多くの視聴者がシンポジウムに集中した。今回のシンポジウムの内容を図5に示す。オープニングでは、岡田理工学部長、天谷医学部長、山中 KLL 所長が対談して、医工+産業界との連携についてのビジョンを語った。続くシンポジウムセッションでは、昨今の科学技術のトピックである AI 技術について、理工学部の新鋭の研究者が研究動向と未来に向けた展望を議論した。第3のセッションでは、スポーツとテクノロジーの関連について、大学と産業界の両方の見地からの講演と議論を行った。最後のセッションでは、医学部、法学部の教員も参加し、世界中猛威をふるっている COVID-19 について、ビッグデータ解析結果、医学、法学、公衆衛生学、理工学の多面的な検討を議論した。慶應義塾は、あらゆる分野の英知を有する総合大学として、COVID-19 のように、理工学と医学だけでは対処できない課題に対しても、様々なソリューションを提供可能であることを示すことができたと思う。

### 産学連携の事例

産学連携の事例としては量子コンピューティング研究の日本のハブとして、IBM と連携して、Keio University Quantum Computing Center を 2018 年に

セッション①	「オープニングセッション (医学部共同主催と今後の産学連携)」 <講演者> 理工学部長 岡田 英史 医学部長 天谷 雅行 KLL 所長 山中 直明
セッション②	「AIが変える未来」 <講演者> 理工学部 教授 栗原 聡 理工学部 専任講師 村田 真悟 理工学部 准教授 緒明 佑哉 理工学部 教授 桂 誠一郎
セッション③	「テクノロジーが拓くスポーツの未来」 <講演者> 大学院システムデザイン・株式会社HIRAKU 代表取締役 理工学部 教授 青木 義満
セッション④	「COVID-19のビッグデータ解析」 <講演者> 医学部 教授 宮田 裕章 法学部 教授 大屋 雄裕 殿町先端研究教育連携スクエア 医学部 専任講師 原田 成 理工学部 教授 満倉 靖恵 理工学部 教授 榊原 康文



医学部長 天谷雅行 理工学部長 岡田英史 KLL 所長 山中直明

図5 TECHNO-MALL 2020 シンポジウム

設立したことが挙げられる (図6参照)。IBM Q ネットワークハブには、発足メンバー企業として、JSR (株)、(株)三菱 UFJ 銀行、(株)みずほフィナンシャルグループ、三菱ケミカル(株)の4社が参画し、その後、三井住友信託銀行(株)、ソニー(株)、(株)日立製作所が参画した。

研究者は、慶應義塾大学理工学部矢上キャンパスから、米ニューヨーク州 IBM Thomas J. Watson Research Center に設置された商用量子コンピューター IBM Q システムにクラウドを通じてアクセスし、量子アプリケーションの開発を行っている。量子金融チーム (慶應義塾大学、東京大学、みずほフィナンシャルグループ、三菱 UFJ 銀行、IBM)、量子化学チーム (慶應義塾大学、三菱ケミカル、JSR、IBM)、量子 AI チーム (慶應義塾大学、三菱ケミカル、みずほフィナンシャルグループ、三菱 UFJ 銀行)、量子創薬・生命イニシアチブ (慶應義塾大学、早稲田大学)、量子ソフトウェア実装チーム (慶應義塾大学、IBM) などが構成されて研究開発を行っている。

理工学部では多くの国家プロジェクトを産学連携で進めている。総務省の ICT 重点技術の研究開発プロジェ

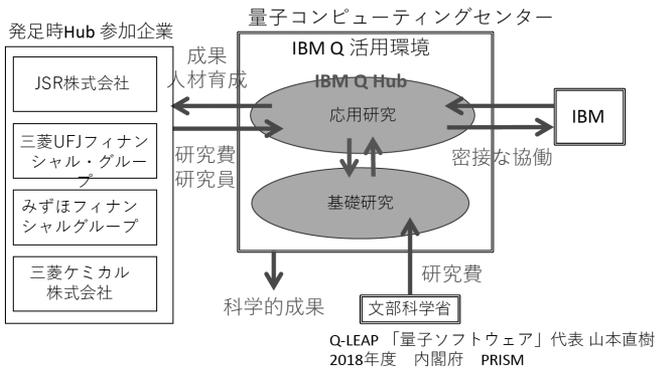


図6 量子コンピューティングセンター連携図  
(<https://quantum.keio.ac.jp/>)

クトでは、(学)慶應義塾、沖電気工業(株)、(国)東北大学、日本電気(株)、(株)KDDI 総合研究所、エピフォトニクス(株)で、「高効率光アクセスメトロ技術の研究開発」を実施している。本プロジェクトでは、2025年から2040年に向けて最重要となる Beyond 5G 技術の中で、メトロアクセス系の高度化、高性能化に慶應義塾大学が中心となり取り組んでいる。大学がハブになり、キャリアやベンダー、さらにベンチャー企業も連携し将来のキーデバイスからトラヒック制御といった高度な運用技術まで幅広い研究開発を行っている。また、国立研究開発法人情報通信研究機構から、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において、フェリカポケットマーケティング(株)、(学)早稲田大学と連携し、「情報銀行による匿名化データサービスと地域持続化実証」を受託している。情報取得を集約しフローとして管理する仕組みの構築、および情報を公開し利用を促進させるために必要な情報匿名化処理や情報を秘匿し、特定の利用を達成するために必要な秘密計算処理の構築を行っている。また、同機構から、高度自動運転に向けた大容量車載光ネットワーク基盤技術の研究開発において、古河電工(株)、(株)メガ

チップス、(国)東京大学、(国)大阪大学と連携し、「多機能光集積回路を利用した高信頼大容量車載光ネットワークの研究開発」を受託している。ここでは、自動運転する車がセンサからの多量の情報を受信して判断・制御するための、車載ゾーン分割型光バックボーンネットワークの研究開発を行っている。

おわりに

慶應義塾が未来に向けて先導的な役割を果たしていくために、水場に動物が集まるように、慶應義塾をハブとして企業が集まり win-win の関係を築きたいと考えている (図7)。また、KLL では、総合大学である利点を最大限に活用するため、医学部を端緒として義塾の総力をあげた産学連携体制作りを進めている。本特集では、義塾における Beyond 5G 技術を紹介しているが、KLL では積極的にこれらの研究に携わる研究者と産業界との連携を進めたいと考えている。2021年12月に TECHNO-MALL 2021 を対面で開催予定である。



図7 大学をハブとする企業連携

慶應義塾大学理工学部 電気情報工学科 津田裕之研究室

津田研究室では、シリコンフォトニクスや石英平面光回路を利用した光通信機能デバイスとその応用に関する以下の研究を進めている。



- ・結晶状態とアモルファス状態で屈折率が大きく変化し、メモリ機能を有する相変化材料を用いた超小型光スイッチ。
- ・光ネットワークノードの小型化と省電力化を目的とする波長分割多重通信用導波路型波長選択光スイッチ。
- ・Beyond 5G の一端を担う、高度自動運転を実現する車載光ネットワーク。
- ・多数のロボットの協調動作のための空間バースト光通信システム。  
(<http://www.tsud.elec.keio.ac.jp/>)

# 社会を変えるデータスマートシティ

情報インフラが電気・ガス・水道と同様に主要なインフラとなった今、その恩恵は多大で社会構造を変えつつある、しかしながら、結果的に地域行政崩壊を招く可能性があるという一面が報告されるようになった。永続的なデータスマートシティはどのように構築すればよいかを説く。

慶應義塾大学  
理工学部 システムデザイン工学科  
教授 西 宏章



## データスマートシティ

スマートシティは非常に広い技術・学問範囲を対象とし、それらの融合領域を扱う点で特徴的である。初めに、スマートシティとデータスマートシティの定義を示し、着目点を明確化する。特に、ITU-T Focus Group on Smart Sustainable Cities や IoT に関する標準 IEEE 2413 といった標準化ドキュメントやデリバラブル (ITU-T のワーキンググループより提出される報告書) に提出し採用された内容に基づいて述べる。まず、筆者は、これらの標準ドキュメントおよびデリバラブルにおいて、スマートシティとは、情報通信技術の導入により高機能化・高度化・高効率化・統合化を図ったインフラであるスマートインフラを、ある地域に複数集中的に導入し、スマートインフラ間の情報やサービスを連携することで新サービスを提供する取り組みであると定義づけを行った。導入先の規模に応じてスマートシティ・スマートタウン・スマートヴィレッジ・スマートアイランドなどの分類があるが本質的に差はなく、地域規模を問わないスマートリジョン、地域社会に注目したスマートコミュニティやスマートソサエティなども同様である。IEEE では、住宅、交通、公害、水・エネルギー、健康・福祉、犯罪といった問題の解決をスマートシティの利用目的としているが、さらに多岐に及ぶことも多く、地域住民の Quality of Life (QoL) 改善といった概念的な目標が定められる場合もある。

スマートシティでは、情報通信技術を用いたインフラ間情報連携やサービス連携による新サービスの提供が求められるが、そのために必要となるデータ流通に着目したスマートシティをここではデータスマートシティ (DSC) と呼称する。さらに、機器連携や自動

制御といったデータ連携は比較的概念理解や実施が容易であるが、ここでは特に、地域住民サービスを中心としたデータスマートコミュニティという観点での DSC について述べる。DSC 構築に向けた動きは、2010 年頃よりスマートグリッドとその他インフラの相互連携により本格化し、以降、パーソナル情報、社会資本情報など様々な情報を集約しサービス提供に結び付ける試みに発展している。この発展には、デジタルトランスフォーメーション (DX) や情報信託銀行といった取り組み、AI、IoT などの技術が必要不可欠である。

DSC における情報サイクルとその依存関係について図 1 にまとめる。サービス提供者に魅力的なサービスを提供しなければビジネスとして成立しないが、そのためには利用価値の高い情報が必要である。社会資本情報など公共情報の利用も重要であるが、確度が高くパーソナライズされ行き届いた動向調査・マーケティング・レコメンデーションなどのサービスを提供するには、個人や企業が直接生み出すプライベート情報の利用が不可欠である。一方でプライベート情報の提供にはオプトインが必要であり、個人が特定されないように必要に応じて匿名化処理を施さなければならない。情報に含まれるユニークな要素について、融合、削除、攪乱といった一般化や乱雑化処理、すなわち匿名化処理を施すことで、情報提供者が唯一に特定し難くすることができる。

この匿名化の議論において、しばしばその前提技術の認識不一致に遭遇するため、この点を明確にする。プライベートな情報を扱う際に、例えば暗号の利用や、近年注目されている数値情報を暗号化したまま計算可能とする秘密計算技術の利用ができれば匿名化は必要

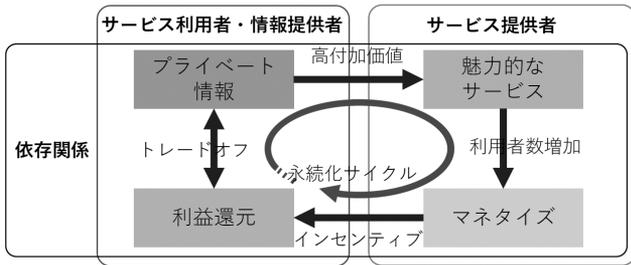


図1 データスマートシティにおける依存関係

ないといった議論があるが、このような手法を用いたとしても本質的にプライベート情報の漏洩対策とはならない。あくまでも情報を秘匿する技術であり、プライベート情報を安全に第三者へ提供するという観点では用をなさない。暗号のままでは処理できず、また、暗号を解けば個人特定が可能な未加工の情報を取り出すことができるため、情報提供者からみればプライバシーの保護手段とはなりえない。情報提供者の特定を困難にして、必要に応じて配布条件を付けて公開するためには、匿名化技術が不可欠である。なお、匿名化処理を外部委託する際、一般にはオリジナル情報を無加工のまま渡して処理を依頼しなければならない。この不確実性を回避するため、秘密分散や完全準同型暗号といった秘密計算を効率よく用いて匿名化処理を暗号化で行う技術を構築済みである。このメリットは後述する情報のカプセル化のところでも詳しく述べる。

### データスマートシティにおける問題点

DSCに関連する取り組みや技術的成熟が進む一方で、その普及速度は鈍い。その理由を以下3つの問題点で整理し、それらの対処方法を示す。まず、DSCにおける情報提供と利用形態について考える。先に述べた匿名化には様々な手法があるが、より重要となるのは匿名化の度合いである。匿名化の度合いが大きいほど特定リスクは少なくなるが、元の情報からかけ離れエントロピーや情報損失度が増大するため、情報の価値が下がる。つまり、その情報を用いたサービスの品質が低下する。サービス品質は高い方が、高い収益が期待できるため、その利益をインセンティブとして情報提供者に還元することにより、匿名化度合いが小さいデータの提供を促すことようにすることもできる。このように、プライベート情報における匿名化度合いと情報提供者への利益還元はトレードオフの関係にあり、情報提供者がインセンティブを勘案しながらこのトレードオフを決定することが望ましい。さら

に、オプトインの取得や、オプトアウトとそれに伴うトレードオフの変更に対する配慮も欠かすことができず、これらを、透明性をもって柔軟に行う必要がある。このような配慮の不足がDSCの普及速度が鈍い理由の一つである。これをデータインフラ問題とする。

持続性に関して、別の観点での問題点を挙げる。地方自治体は生活における必須インフラを住民へ公平に提供し、維持する責務があり、それには安定した税収が不可欠である。では、情報インフラはどうか。今や生活必須インフラの一つといえるが、そこから適切な地域税収を確保できているであろうか。例えば、自宅からネットで電子マネーを使って買い物をし、その商品を隣町から配送トラックが自分の町の道路を利用して配送し、配送先の玄関に置き配したとする。地方自治体からすれば、住民情報が利用され、市の道路などのインフラもただ乗りされ、さらに店舗も配送センターも当該地域にないため、地域内店舗で購入する場合と同等の税収を見込むことはできない。つまり、この商取引は居住地域に適切な税金を納めているといえないと考えることができるであろう。この状況は情報インフラの重要度が増すほど深刻化し、同様の事例は他にも多数見ることができる。そして、このような状況を解決するのも情報通信技術である。地域から出ていく情報のやり取りや、関連する商取引への課税手段を情報通信システム上で確保すればこの状況は改善する。これには異論も想定されうるが、情報だけが特例である現状の正常化と考えられないだろうか。道路や商業活動と同様に租税できなければ、情報によるグローバル化は地方自治の崩壊をもたらす方向に進みはしないか。この問題を解決するには、より公平かつ確実に、そして社会還元と地域持続化を前提とした課税の仕組みが求められ、その構築論も必要となる。これらを情報課税問題とする。

### 情報銀行とエッジコンピューティングによる解決

情報銀行とは、オープンな情報も扱うが、個人や法人などにひも付いた情報を預託され、他の事業者とのマッチングや匿名化したうえでの情報提供を一元管理する制度あるいは事業者のことである。特に信託とあるようにそこから現金化することも重要な役割である。さいたま市が2014年に運用開始した「情報共通プラットフォームさいたま版」の情報管理の仕組みを見ながら上記問題解決について考える。なお、さいたま市はスマートシティさいたまモデルの構築が進めら

れており、その一環として情報流通プラットフォームの構築が行われている。これらの取組みにより、さいたま市は2019年にミソノ・データ・ミライプロジェクトでImpress DX Awards 自治体部門グランプリを受賞、2021年1月に全国市区のSDGs先進度ランキング総合1位に選ばれた。我が国においては初の情報銀行を中心とした情報流通システムの構築と実証が行われた例と考える。

プライベート情報を扱うには、個人情報保護法に基づけば、まず初めにオプトインの取得が必要となる。適切な匿名化が行われれば二次利用が可能とされているが、適切な匿名化が何かは不明瞭であり、かつ理論的にもあらゆる攻撃に耐えうる完璧な匿名化は存在しない。従って、現時点では匿名化をオプトイン省略手段としてではなく、漏洩リスク低減手段の一つとしてとらえ、情報提供者への配慮手段と割り切る。個人情報情報をそのまま提供するのは及び腰でも、匿名化した状態での提供であれば情報流通を加速化できる可能性がある。すでに述べたように匿名化度合いと情報の価値やその提供報酬はトレードオフの関係にあるため、ユーザはサービス提供者の信用度合いや、サービスの価値などを勘案して、情報提供の可否やその匿名化レベルを自由に選択できるようにする。

これらを管理する仕組みは、さいたま市の例ではVendor and Consumer Relationship Management (VCRM) により実現されている(図2)。まず、情報提供者かつサービス利用者である消費者を、サービス提供者がサービス利用契約や利用料金徴収などで管理するのが一般的なConsumer Relationship Management (CRM) である。逆に消費者がサービス提供者を管理するのがVendor Relationship Management (VRM) である。VCRMはCRMとVRMの両方、さらに、情報とサービスの流れや連携、サービスの提供契約やその時の匿名化度合いなどあらゆる情報をRelationshipとして管理する。例えば、消費者があるサービスの利用を検討する際、信頼できるならば匿名化度合いが小さい情報を提供し、より確

度の高いサービスを受けたいと考えるであろう。逆に、お試しでサービスを受けたい場合などは匿名化度合いを高くしたいと考えるであろう。VCRMは消費者はいつでも情報提供における匿名化度合いを変更、また提供を停止できるようにし、サービス提供者においても、情報提供によるインセンティブを勘案したサービス利用料を提示し、契約に従いサービスの提供停止なども可能とする仕組みである。都市OSや情報銀行にVCRMを備えることで、データインフラ問題が解決する。

情報銀行にとって重要な役割は、サービス提供のプラットフォームを担うということと、安心できる情報流通を実現するプロフェッショナルであるということである。情報漏えい対策などセキュリティの観点で情報が違法に取得されないよう監視する役割を担う。特に地方自治体と連携した地域情報銀行は、当該地域住民にとって同一地域に住む運命共同体であり、信用できる存在となりえる。住民は情報銀行を介することで安全なサービス提供や情報活用が可能であると認識し、プラットフォームも情報銀行からデータ提供を受けるように情報流通の仕組みをアップグレードできれば、情報銀行での取引に対して公平かつ明瞭な課税が可能となる。これにより情報課税問題が解決する。

さいたま市は、同種サービスの日本における先駆けとして、米国NIST(アメリカ国立標準技術研究所)によるGlobal City Team Challengeのアクションクラスター、またUrban Technology Allianceメンバーなど、国際的な活動に参加しており、関連技術標準化におけるユースケースとしても参照されている。図3に示すように、さいたま市では様々な情報の取得とその情報を利用したサービスの提供実験が行われた。

なお、情報銀行という定義ではないが、街区にある様々な情報を一括して扱い、提供するという試みは以前より存在した。さいたま市の例が地方自治体主導によるデータスマートシティとすれば、民間企業主導によるデータスマートシティとして、綱島スマートサステナブルタウン(TSST)について概要を述べる。TSSTはパナソニック工場跡地を利用し、大林組、野村不動産、アピタテラスなどと共同で街づくりを進めている。その情報プラットフォームとしてSCIM(<https://tsst.scim-service.jp>)を公開しており、様々な街区情報を即時に入手できる。この仕組みを用いた融合サービスの提供も検討されている。ただし、現時点でプライベート情報に踏み込むサービスの展開には至っておらず、居住者にとって魅力的なサービスを提供するには至っていない。一方で、商業設備も備える

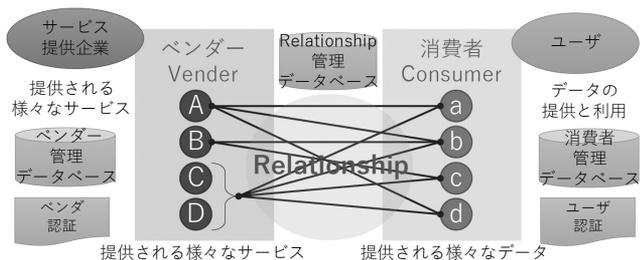


図2 データスマートシティにおける依存関係と評価指標

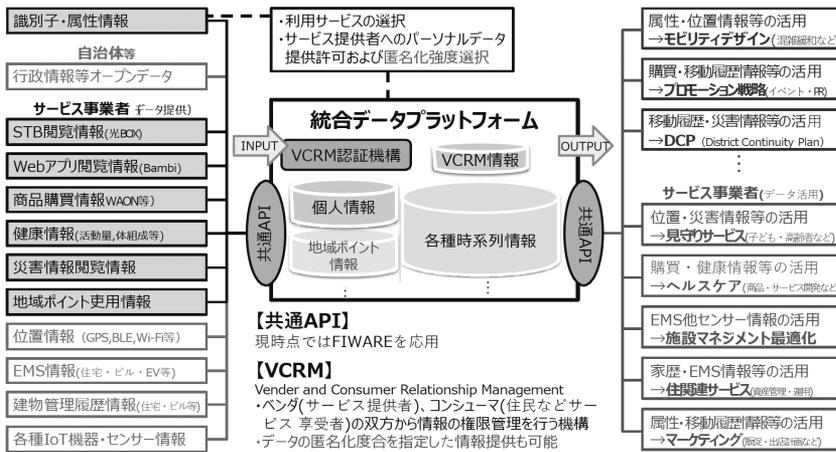


図3 さいたま市におけるデータプラットフォームの例

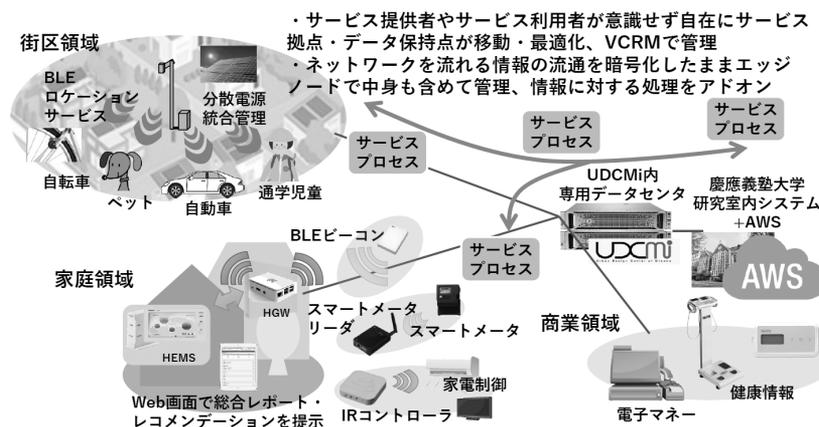


図4 さいたま市における情報取得インフラの例

パナソニックによるスマートサステナブルタウンは、湘南藤沢に続いて、綱島、門真と広がりを見せており、パナソニックにおける将来を見据えた重要な戦略の一つとみることができる。トヨタによるウーブンシティでは、さいたま市での例と同様に、センサーや人工知能を使った住民の健康管理の取り組み例が紹介されている。NTTではIOWNといったデータスマートシティにおける主に情報通信網にかかわる技術イノベーションの提案が発表された。このように、ここ数年でデータスマートシティを目指す動きは活発化、本格化しており、今後の相互連携と発展が望まれる。

以上、データスマートシティにおける情報銀行を介したサービス提供、そしてこれに付随する様々な工夫により普及障害を取り除く道筋について述べた。情報銀行の普及と発展により、地域住民向けサービスの質の向上や利用促進を促すこと、そして地域住民のQoLや地域満足度を高めることが可能となること、さらに地域持続化に貢献し、社会問題解決に役立つことを期待している。

西 宏章

❖❖ 筆者紹介 ❖❖

技術研究組合新情報処理開発機構並列分散システムアーキテクチャつくば研究センター、株式会社日立製作所中央研究所を経て2003年に慶應義塾大学助手、2014年より教授。現在、さいたま市における(一社)美園タウンマネジメント代表理事、美園タウンマネジメント協会代表、(一社)おもてなしICTコンソーシアム理事長、(一社)エッジプラットフォームコンソーシアム理事。

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 西研究室

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科西研究室では、データスマートコミュニティインフラおよび関連する情報処理・情報通信システムの構築とその実証によるQoL向上社会の実現に取り組んでいます。情報学を中心とした複合学問領域を扱い、これまで、長崎県五島列島のスマートアイランド、宮城県栗原市のICTライフインフラ、川崎市のスマートコミュニティといった関連プロジェクトに代表として関わってきました。また、技術標準化活動も積極的に行っており、IoT関連の技術標準、エッジコンピューティングに関わる技術標準、スマート農業に関する技術標準に取り組んでいます。技術標準化活動では定期開催のPlugfestと呼ばれる相互結合試験に学生も参加して世界の技術者と交流しており、フランス原子力庁(CEA Leti, List)やジョージア工科大との共同研究契約に基づく学生交流も行われるなど国際的活動も進めています。



## サイバーフィジカルが生む高度な制御技術

高度と呼んだ理由については、図2を見てもらいたい。交差点での優先制御であるが、普通は交互に合流する。実社会では“我先に”という、むしろ混乱が生じる制御とも言える。ここで導入されるのは Social Welfare という考えである。つまり社会全体として得になるように考える。この場合は、自動車全部の合計の待ち時間を最小にするという考えである。もちろん、いつまでも合流できないのは困るので、遅延時間の上限は保証する（Social Welfare は政策研究大学院大学の田中誠教授との共同研究における成果 [1]）。この合流制御は、各車間で行うのではなく、サイバー上に作られた各自動車のエージェント間で協調する。さらに、サイバー上なので、各自動車間の現在までの運転時間や目的地までの距離、さらに、予定よりも遅れているか否かも考慮できる。例えば、駅まで行く人と長距離を運転してきた人では待ち時間の感じ方も異なるかもしれない。もちろん、プライオリティ（優先権）の制御は重要であり、一つの交差点におけるプライオリティだけでなく、一つ目の交差点では道を譲ったら二つ目の交差点では一つプライオリティが高くなることも考えられる。社会科学的ではあるが、お互いに譲ってくれた人は、いずれかで他の人に譲ってもらえる社会は理想的である。経済学者の崔真澄さんは、この自動運転プラットフォームを見て、別の意見を示唆された [2]。これは、制御をインセンティブに結びつけるものである。つまり、「道を譲ってくれたので、譲ってくれたエージェント（車）に0.1円支払う」。さらに進むと、急いでいるエージェント（車）は、オークションのように「50円あげるから道を譲って」というクエリを交差点の相手に送り、やり取りするといった新しい形の経済フレームワークができる。例えば我々の知っていることとして、アミューズメントパークで“ファストパス”を購入すると、乗り物に並ばないで済む。逆に、時間に余裕がある人は安い入場券で

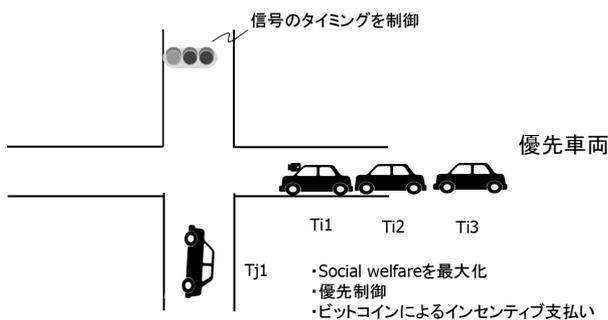


図2 交差点での制御の例

入れるので、ある意味平等となる。このように、これからの技術は技術単独ではなく、ビジネスモデルはもとより経済や社会科学としても考え、制御の高度を目指すものである。

## 位置・時間を正確に把握するサイバー空間の構成法

S&CCにおいては、位置と時間が重要なパラメータとなる。我々のアプローチでは、各車の位置は、RTK-GPS（高精度GPS）で正確に分かる。さらにLiDARを使って、さらに正確さを増している。そのため全ての自動車の動きから道の混雑はもとより、駐車中の車や、さらには、それらを学習して、「夕方はこの辺りはスーパーの駐車場で混む」といったノウハウが得られる。これをサイバー上で蓄積し、他のエージェント（車）に必要なに応じて渡すことができる。例えば、初めて名古屋に行っても、ベテランタクシードライバーのように最適な道を選ぶことができる。簡単に言ったが、駐車中の車のような情報は、明日になれば意味がない。一方、機械学習による混雑推定は長時間、天候や季節も考慮する必要がある。

## ダイナミックビッグデータが作る新しいサービス

この位置の正確な把握は、災害時の救援活動等、多くの実用的なアプリケーションがあるが、我々は配送等への応用を例にS&CCのアプリケーションとして検討した。図3はピザの配達のスケジュールリングシステムの一画面である。各配達のパイクの位置は、リアルタイムで分かり、安全配達とスケジュールリングの精度が上がる。つまり、アルバイトの人の効率や業務管理。10分後に戻ってくるので正確な配達予定を立てる。ここでは、30分以内の配達を目指し、10分以上

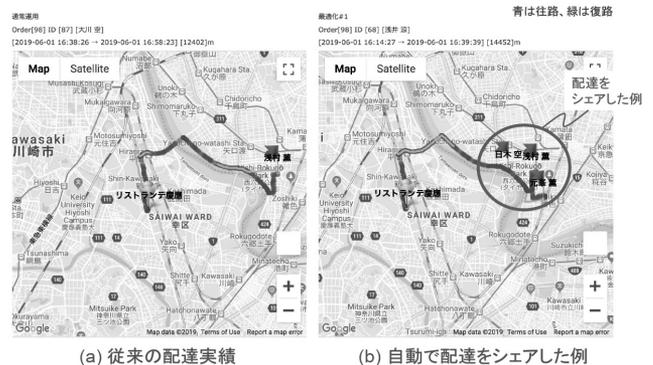


図3 配達の自動シェア化のスケジュールリング結果

の遠回りはしないという制約のもとに、複数箇所をシェアして配達する方法を検討した。つまり、近所の配達を一筆書きで回ることを意味する。その結果を図4に示した。1日の配達状況を見てみる、同じアルバイト人員で30分を越えてしまう確率（失注率と定義）が13%減少し、配達回数も35%削減した。このように高効率化ができる。この考えは、タクシーの最適配置や宅配便のスケジュールリング等、多くのアプリケーションが存在する。米国UberやLIFTといったシェアライドも、リアルタイムでニーズと車両を把握し、「料金」という手法で効率の良いマッチングを行っている。もちろん学習により、配車アシストをして、需要が生じやすい場所をリコメンドし、配車を促し、マッチングを高めている。我々は、さらに例えばA地区には午後6時に、B地区には午後7時に、「今なら500円引きのクーポン」などのキャンペーンを行うと、需要側をマニピュレートでき、さらなるシェア効率が高くなることも証明した。本システムではオーダーが入ると、AIが解析して、「このマンション付近ではこれから30分以内に他のオーダーが入る可能性がXX%」と計算し、配達を保留するといった戦略が作れる。つまり、30分以内に近所にシェアできるオーダーが生じそうにない場合は、注文を受けて即時に配達する。オーダーが生じそうであれば、可能な限り保留してシェアを作る。このようにダイナミックな情報と機械学習を駆使し情報を活用することは、新しいサービスを創造する。

整理すると、現在は購買履歴やTwitterといった、いわばStaticなビッグデータの活用が中心である。このビッグデータの活用においては、いかに大量のデータを所有できることが戦略的に有利となる。これがビッグデータの時代である。一方、Beyond 5Gでは、

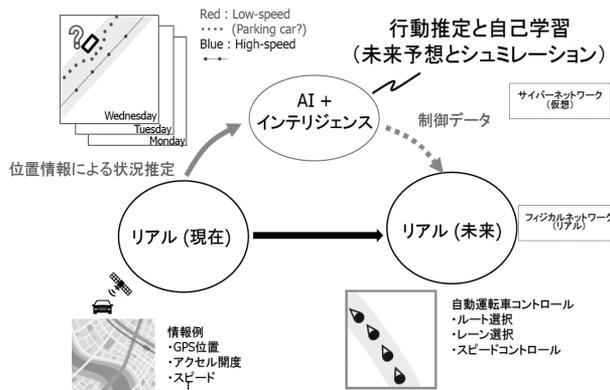


図5 Beyond 5Gでのダイナミックビッグデータの活用法

現在の位置を含めた空間（位置）時間的な情報として活用し、未来を予想するようなダイナミックビッグデータが重要であることがわかる。ダイナミックビッグデータは、リアルタイムな位置等の情報と学習という過去の情報（知）を手に入れ、サイバー上で未来（シミュレーション）を予想し、より良い未来となるようにシミュレーションを繰り返し、現実をコントロールする。図5には、自動運転を例に取り、サイバーフィジカルでどのような機能が重要かを述べた。AIを使ったインテリジェンスや未来をシミュレーションした高度な設計、その結果をリアルにフィードバックというフローとなる。今回はクローズで利用できるダイナミックビッグデータのシステムを自動運転で説明した。

### サイバーフィジカル制御の未来

サイバー／フィジカルを分離して、高度にコントロールする技術について、自動運転車を例に取り述べた。従来は、サイバーはクラウドであったために、本当の意味でのリアルタイム処理にはなっていなかった。Beyond 5Gでは、アクセス系はもとより、ネットワークも極めて低遅延で実現することが目標とされている。つまり、サイバー／フィジカルは、同期してオペレーションされることになる。完全にリアル空間をサイバー上に再現して、高度な調停、制御を行うことをデジタルツインと言う。デジタルツインにおいて、複数エージェント間の協調だけではなく、クラウド上に蓄積された高度な知識や学習データを利用することができる。その結果、現状と同期したデジタルツインから近未来を予想して、数々のシナリオをシミュレーションすることにより、30秒先の未来を最適に設計することができる。つまり、その理想の未

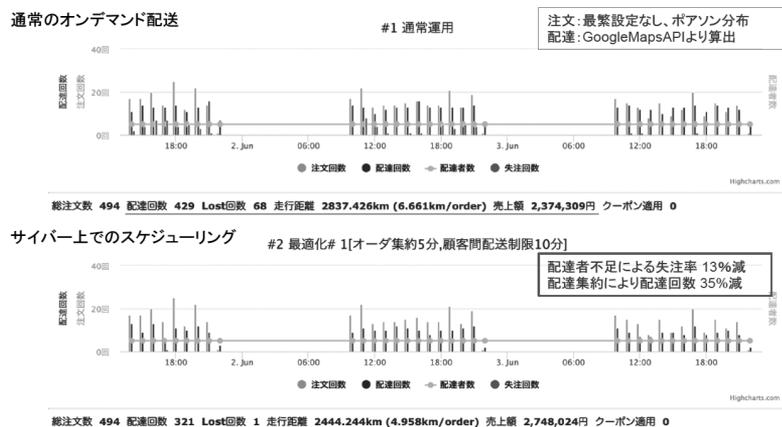


図4 1日の配達スケジュール結果例

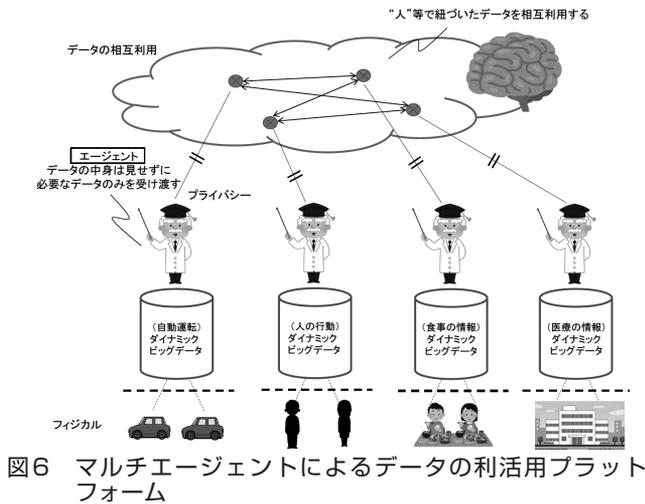


図6 マルチエージェントによるデータの利活用プラットフォーム

来に基づき、現在を制御するという今までとは逆の世界が実現するとも言える（バックキャスト型制御）。

更なる未来は図6にあるように、複数のシステムがこれらのビッグデータを持っており（時系列的に）、エージェントを介して相互に利用することがさらに重要である。例えば「病院である症状が出ている。この患者の過去の行動（運動や過労）と食事（栄養の偏り）を組み合わせると、診断の正確性のみではなく予防にも大きく貢献する。その場合は、データそのものにはアクセスできなく、プライバシーを守った中でマルチエージェントによる連携解析が重要となる。

むすび

自動運転技術を取りながら、次世代のサイバーフィジカルシステムに基づくダイナミックビッグデータの活用と、それによって実現されるビジネスモデルについて述べた。Beyond 5Gでは、瞬時、瞬時に発生するデータを位置等のメタ情報とともに取得し（ダ

イナミックデータ）、大量の過去のデータ（過去の知）と組み合わせ、最適に制御することが求められる。さらに、異なったアプリケーション上で得られたデータを相互にセキュリティを守った形で連携することが、今後の重要な課題となる。

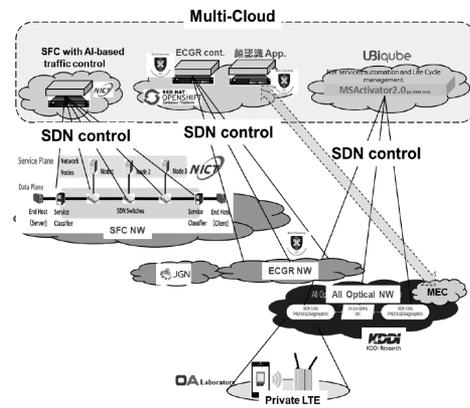
<参考文献>

- [1]遠藤光泰, 浅見康介, 沓澤遼, 山本草詩, 高島研也, 田中誠, 竹下秀敏, 山中直明, “電力網内満足度を最大化する完全競争市場下での電力分散協調手法”, “電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (NS), Vol. 114, No. 477, NS2014-228, pp. 295-300, February 2015.
- [2]山中直明, 崔真澄, 中村武宏, “ビヨンド 5G が描く未来 —2030 年の日本で実現すべきこと—”, 慶應義塾出版会, 2021 年秋発行予定

17th International Conference of Intelligence & Processing over Optical Network (iPOP2021)  
<https://www.pilab.jp/ipop2021/>

2021 年 9 月 30 日から 2021 年 10 月 1 日 (予定)  
 NTT 武蔵野 R&D センター  
 (コロナ禍によりオンライン開催予定)

iPOP は今回で 17 回目となる光ネットワークをコアとして、近年は IoT やネットワークプロセッシング技術と組み合わせたこの論文のような技術も多く扱う。光の技術で相互に接続されたプロセッシングリソースは、そこに流れ込むデータを高速で処理し、制御するのに最適で、クラウドの高速化となるだろう。本 iPOP は、講演のみではなく、ブースや showcase、相互接続 (図参照) といった公開実験についても発表される。通常の国際会議と大きく異なり、参加者の 70% 以上がキャリアやベンダーの研究者や技術者である。オンライン開催が予定されているが、最先端技術のブースや showcase もオンラインを駆使してプレゼンテーションされる。



慶應義塾大学理工学部 情報工学科 山中研究室

慶應義塾大学理工学部情報工学科山中研究室は、主にフォトニックネットワークや通信プロトコルなどを中心に、次世代の光バックボーンネットワークの基盤技術から大規模な画像配信のアプリケーションに関して研究を進めています。今年のキーワードは大容量メディアとエネルギー、自動運転制御（スマートネットワーク）です。研究は、デバイスに近いところからアプリケーション、ネットワーク設計等フォトニックをキーワードに広範囲にカバーしています。多くのナショナルファンドや企業とのコラボレーションを通して、国際的にもフォトニックネットワークのセンターオブエクセレンスな研究室です。

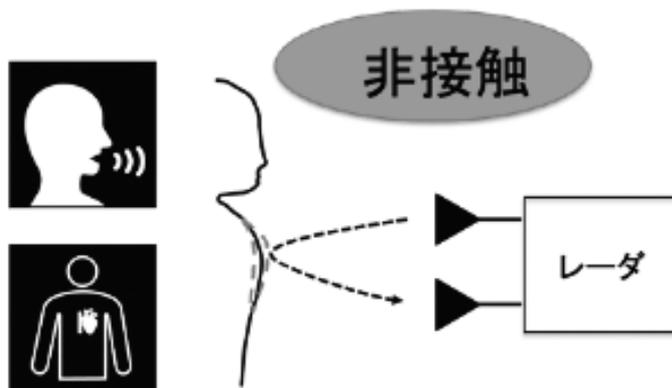
研究室の特長は、多くの産官学連携とグローバル共同研究です。米国 2 大学との NSF (National Science Foundation, USA) をベースとした研究 (JUNO プロジェクト) がその代表を務め、また、理工学部内では KIF (Keio Innovation Foundry) を立ち上げて、革新的な産官学連携拠点として “スマートネットワーク” 研究センターを開設しています。理論、実験、実証、アカデミック活動と幅広い研究室です。

# 5G時代のスマートヘルスケア

## ～ 非接触ヘルスマニタリング ～

5G時代は with/after コロナ時代でもあり、心身の健康がこれまで以上に重要である。特に Covid-19 のような感染症の対策として、非接触は重要なキーワードとなっている。本稿では、スマートヘルスケアを実現する非接触ヘルスマニタリング技術を紹介する。

慶應義塾大学  
理工学部 情報工学科  
教授 大槻 知明



レーダを用いた非接触生体信号検出

### はじめに

既にサービスが始まった第5世代移動通信 (5G) では、急増するモバイルトラフィックを収容するだけでなく、M2M (Machine to Machine) や IoT (Internet of Things) に見られるように通信機能が具備された様々なものを収容することが求められている。また、5Gでは、種々の利用シナリオが想定されており、各利用シナリオで異なる要求を満たすことも求められている。ヘルスケアは、5Gの重要なアプリケーションの一つであり、例えば総務省の取り組みである総合実証実験では、5Gを活用した遠隔医療や、5Gを活用した救急医療の実証実験が行われた。5G時代は with/after コロナ時代でもあり、心身の健康がこれまで以上に重要である。特に Covid-19 のような感染症の対策として、非接触は重要なキーワードである。

### ドップラーセンサを用いた非接触呼吸・心拍信号検出

ドップラーセンサは、ドップラー効果を用いたセンサで、ドップラーレーダとも呼ばれている。ドップラセンサは、電波 (マイクロ波) を発射し、反射した電波の周波数と発射した電波の周波数を比較することで、人や物体の速度や動きを検出する。一般には、対象物の速度を計測するスピードガン、衝突防止などの距離計測、人感・省エネ・自動ドアセンサなどに用いられている。ドップラーセンサでは、「特定小電力無線局移動体検知センサ用無線設備」としてセンサに使うことが許可された 10.5GHz 帯や 24GHz 帯の周波数

が一般に用いられる。ドップラーセンサを用いた行動識別では、ドップラーセンサで得られるドップラー情報に基づく機械学習による識別がよく用いられている。

行動識別に加えて、ドップラーセンサを用いた非接触生体信号検出も注目されている。生体信号として、心拍数や心拍間隔、呼吸、瞬きなどを検出できる。図1に、心拍や呼吸信号のドップラースペクトル図を示す。例えば、心拍数や心拍間隔の変動から、健康状態や緊張度・ストレス度を把握できることが知られている。また、Covid-19の初期段階の症状は呼吸器系にも多く現れることが報告されているが、ドップラーセンサを用いれば、非接触でそれら呼吸器系に現れる症状をいち早く検出することが期待される。

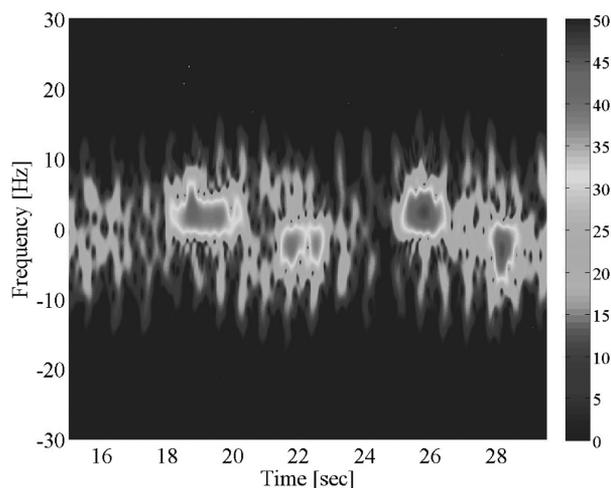


図1 心拍や呼吸信号のドップラースペクトル図

ドップラーセンサによる呼吸・心拍信号検出の原理は、古くから知られている。また、実験により、被験者が静止着席状態や横たわって静止している状態では比較的高精度に検出できることが報告されている。しかし、心拍や呼吸に起因する胸壁の動きは微小であり、体動や雑音に容易に埋もれてしまう。そのため、体動や雑音が存在する現実的な環境でも呼吸・心拍を高精度に検出できる手法が望まれている。

心拍と呼吸の周波数のドップラーレーダを用いた非接触心拍検出法は、高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) に基づく方法、連続ウェーブレット変換 (CWT: Continuous Wavelet Transform) に基づく方法、および逆正接関数 (Arctangent) 復調やスパーススペクトル再構成 (SSR: Sparse Spectrum Reconstruction) といった信号処理技術に基づく方法に大別される。これらの方法では、心拍検出のため、ドップラーレーダ信号に対して FFT をかけ、心拍成分に相当する周波数領域のパワースペクトルから心拍を推定する。例えば、我々は受信レーダ信号のスペクトログラムを計算し、心拍成分が現れる周波数帯のパワースペクトルの積分値を求め、スペクトルピークを検出することにより、心拍の R-R 間隔 (RRI: R-R Interval) を推定する方法 (スペクトログラム法) を提案している。また、受信レーダ信号に高い時間-周波数解像度を実現する CWT を適用し、低周波数帯域の解像度を高め、検出精度を改善している。CWT に基づく方法は、適切なスケールファクタの選択が必要である。我々は、各スケールファクタにより算出したウェーブレット係数の隣接ピーク間隔の差に基づき、適応的にスケールファクタを選択する手法を提案している。

FFT や CWT に加えて、MUSIC アルゴリズムを用いた心拍数推定法も従来検討されている。MUSIC アルゴリズムは到来方向推定や高分解能周波数推定といった用途で広く利用される。従来研究では、MUSIC アルゴリズムに基づく心拍数推定法は、FFT に基づく手法よりも高精度に心拍数を推定できることが示されている。しかし、MUSIC アルゴリズムに基づく手法の心拍数推定精度は、解析する信号を構成する正弦波の数  $P$  に大きく依存し、最適な  $P$  を推定しなければならない。 $P$  を推定せずに心拍数を推定する手法も従来検討されているが、60 秒程度の長い時間幅で 1 つの心拍数を推定するため、ストレス推定に必要な数秒程度の細かい心拍数変動を推定できないという問題がある。

これに対し、我々は MUSIC アルゴリズムを基に、短い時間幅で高精度に心拍数を推定する手法を提案している。提案法のフローチャートを図 2 に示す。提案



図2 MUSIC アルゴリズムを用いた心拍検出法のフローチャート

法では、まず、I/Q 信号をダウンサンプリングし、帯域通過フィルタ (BPF: Band Pass Filter) に通す。BPF 出力の位相信号に対し離散コサイン変換を適用し、心拍に起因する可能性が高い成分のみを抽出し、抽出した成分のみを用いて、逆離散コサイン変換により信号を再構成する。この処理により、非心拍に起因する雑音の影響を低減し、短い時間幅でも高精度に心拍を推定できるようにしている。図 3 に提案法による着席静止時の心拍数の検出例を示す。図より、提案法は従来法より優れた検出特性を達成しており、ECG (ElectroCargioGram) で得られた真値に近い特性であることが確認できる。図 4 に、被験者数 10 人に対する、着座静止時及びタイピング時の心拍数の平均相対誤差特性および心拍間隔の平均 RMSE (Root Mean Square Error) 特性を示す。図より、提案法はタイピング時にも高い精度で心拍数及び心拍間隔を検出できることがわかる。

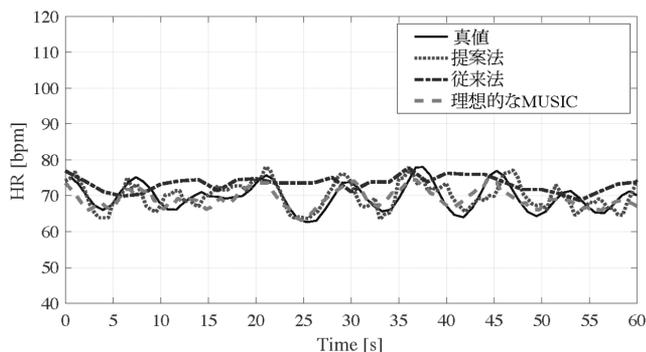


図3 心拍数の検出例：着席静止時

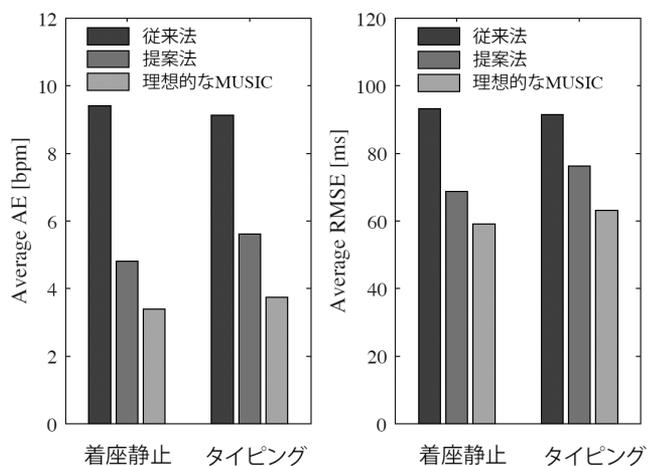


図4 心拍数の平均相対誤差特性および心拍間隔の平均RMSE特性：被験者数10人

### ドップラーセンサを用いた非接触血圧測定

心拍や呼吸に加えて、我々は、非接触血圧測定技術の開発にも取り組んでいる。血圧の上昇は臓器機能の低下との関連性が高く、脳心血管疾患を発症させる原因の一つと言われている。そのため、健康管理には日常生活での血圧測定が重要であり、様々な血圧測定法が研究されている。代表的な血圧測定法に、聴診法とオシロメトリック法がある。聴診法は主に医師によって行われ、上腕をカフで圧迫し、カフの圧力を変化させた際の血管音を聴くことで血圧を測定する方法である。カフを減圧していくと、動脈が少し開き血液が流れ始めることで、血管音が聞こえ始める。さらにカフを減圧していくと血管音が聞こえなくなる。このとき、血管音が聞こえ始めたときのカフの圧力を収縮期血圧（SBP：Systolic Blood Pressure）といい、血管音が聞こえなくなったときのカフの圧力を拡張期血圧（DBP：Diastolic Blood Pressure）という。しかし聴診法は、医師の技量によって測定誤差が生じやすく、腕の太さなど体格によっては血管音が聞こえにくい。



図5 血圧推定実験風景

オシロメトリック法は、上腕をカフで圧迫し、カフの圧力を変化させた際の血管運動に起因する波形（脈波）を観察することで血圧を測定する方法である。腕を減圧すると脈波の振幅は急激に大きくなり、より減圧すると振幅は小さくなって、最終的には脈波の振幅が安定する。このとき、脈波の振幅が急激に大きくなったときのカフの圧力がSBP、安定時のカフの圧力がDBPに対応している。オシロメトリック法は医療分野で広く普及しており、家庭用血圧計にもこの方法が用いられている。しかし、オシロメトリック法はカフの装着が必要であり、睡眠中の血圧測定など日常生活での血圧測定には好ましくない。そこで、PTT（Pulse Transit Time）に基づく血圧測定が研究されている。PTTは脈波が動脈の一部を伝搬する時間と定義されている。血圧が上昇すると脈波の伝播速度は上昇し、PTTは短くなる。逆に血圧が低下するとPTTは長くなる。そのため、血圧とPTTには負の相関関係があり、この相関関係に基づいて血圧を推定できる。基本的に、PTTはPPG（PhotoPlethysmoGraphy）とECG（ElectroCargioGram）など複数のセンサを用いて身体異なる部位での脈波の立ち上がり時間を比較することで算出する。PTTを用いた血圧測定法ではカフを使用せずに血圧を測定できるが、センサを装着するという課題は残る。そこで、我々は、非接触血圧測定として、ドップラーレーダを用いた手法を提案している。提案法では、ドップラレーダで得られた信号に対し、深層学習に基づく波形再生を適用することでPTTを高精度に検出し、血圧を推定する。レーダと被験者間の距離や被験者を変えて複数の実験を行った結果、提案法はSBPを3mmHg～5mmHg程度の誤差で検出できることを確認している。

## 低解像度赤外線アレーセンサを用いた行動識別

ドップラーレーダ以外の非接触技術として、我々は暗闇での利用やプライバシー保護ができ、ビデオカメラ程ではないものの、多くの情報を得られる低解像度赤外線アレーセンサを用いた行動識別手法を提案している。低解像度赤外線アレーセンサは、低コスト、小型、高プライバシー、非接触といった特徴がある。その名前が示すように、内部に多くの赤外線検出素子を備えており、二次元平面上の温度分布を取得できる。提案法では、例えば天井に設置した低解像度赤外線アレーセンサで得られる温度分布情報から複数の特徴量を抽出し、機械学習を用いて「無人」、「静止」、「歩行」、「着席」、「転倒」等の複数行動を検出・識別する。深層学習を用いることで、転倒などの行動を高精度に検出できることを確認している。



図6 低解像度赤外線アレーセンサを用いた行動識別のイメージ図

## むすび

Covid-19 や将来予想される感染症の対策として、非接触生体信号検出技術のいくつかを紹介した。提案技術を用いれば、家庭での常時モニタリングも可能となるため、感染症の早期発見にも役立つことが期待される。現在、提案技術のいくつかを実際の住宅に設置し試験運用が始まっている。研究開発とその実装を通して、みんなが安心して、心地よく暮らせる普通の社会を早く実現したいと思う。

### <参考文献>

- [1]C. Ye, K. Yamamoto, and T. Ohtsuki, "Spectral Viterbi Algorithm for Contactless Wide-range Heart Rate Estimation with Deep Clustering," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques 2021 (Accepted)
- [2]K. Yamamoto, R. Hiromatsu, and T. Ohtsuki, "ECG Signal Reconstruction via Doppler Sensor by Hybrid Deep Learning Model with CNN and LSTM," IEEE Access, vol. 8, pp. 130551-130560, 2020
- [3]K. Yamamoto and T. Ohtsuki, "Non-contact Heartbeat Detection by Heartbeat Signal Reconstruction based on Spectrogram Analysis with Convolutional LSTM," IEEE Access, vol. 8, pp. 123603-123613, 2020
- [4]C. Ye, K. Toyoda, and T. Ohtsuki, "Blind Source Separation on Non-contact Heartbeat Detection by Non-negative Matrix Factorization Algorithms," IEEE Trans. on Biomedical Engineering (TBME), vol. 67, issue 2, pp. 482-494, Feb. 2020
- [5]S. Ishizaka, K. Yamamoto, and T. Ohtsuki, "Non-contact Blood Pressure Measurement using Doppler Radar based on Waveform Analysis by LSTM," IEEE International Conference on Communications (ICC2021), Montreal, Canada, June 2021.
- [6]石坂秀士, 山本幸平, 大槻知明, "LSTMによる波形解析に基づくドップラーレーダを用いた非接触血圧測定," 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会(MICT), オンライン, 2020年11月4日.
- [7]K. A. Muthukumar, M. Bouazizi, and T. Ohtsuki, "Detection of human activity based on hybrid deep learning model using a low-resolution infrared array sensor," 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI), オンライン, 2020年11月27日.
- [8]M. Bouazizi and T. Ohtsuki, "An Infrared Array Sensor-Based Method for Localizing and Counting People for Health Care and Monitoring," 42nd International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2020), Sep. 2020.

## 慶應義塾大学理工学部 情報工学科 大槻研究室

慶應義塾大学理工学部大槻研究室は、教授1名、特任助教3名、後期博士課程学生8名、修士学生13名、学部生9名の計34名により構成されている。大槻研究室では、無線通信を中心とした通信技術と、安心安全な社会実現に向けたセンサ、機械学習などの研究を行っている。研究室の特徴として、特任助教全員を含め12名の海外出身者の存在が挙げられる。多様な文化的背景を持つメンバーとの触れ合いは刺激的でおもしろく、研究にも非常にプラスとなっている。このようなダイバーシティ(多様性)は不可欠である。ダイバーシティは、私の専門である無線通信でも、受信電波の変動であるフェージング対策に必要な技術である。これからも多様なメンバーと研究に取り組んでいきたい。

<https://www.ohtsuki.ics.keio.ac.jp/>

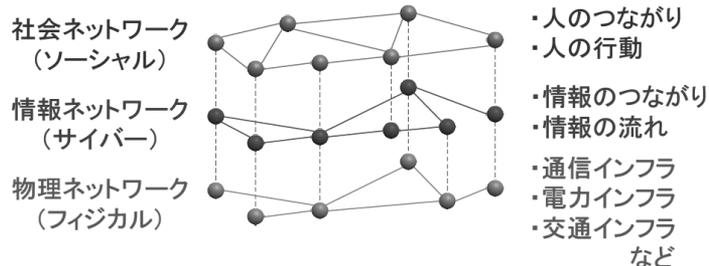


夏合宿の風景

# サイバー・フィジカル・ソーシャルシステム(CPSS)のネットワーク化制御

～ 人・機械・ネットワークが共創するシステムレベル品質 ～

Beyond 5G/6G 時代の多様な通信品質を実現するためには、サイバー空間と物理空間に加えて、人・社会空間を考慮したシステムレベル品質制御が必要不可欠である。本稿では、システムレベル品質に基づくネットワーク化制御技術を紹介し、共創型サイバー・フィジカル・ソーシャルシステム (CPSS) の実現に向けた今後の展望を述べる。



CPSS のネットワーク構造

慶應義塾大学  
理工学部 電気情報工学科  
准教授 久保 亮吾

## はじめに

Beyond 5G/6G 時代のネットワークアプリケーションでは、通信品質をシステムレベルから捉える必要がある。例えば、エンド・ツー・エンド (E2E) の遅延を1ミリ秒以下とする Tactile Internet [1] の概念が提唱されており、2030年代には遠隔ロボット制御等への応用 [2] 期待されている。これまでに、5GとMEC (Multi-access Edge Computing) の組み合わせによる低遅延化については盛んに研究報告がなされているものの、これらの適用先は局所性を前提としたシステム、例えば、同一のMECサーバ配下の遠隔ロボット制御等に限定されている。つまり、物理的に低遅延化できない広域システムでは Tactile Internet を実現できないため、既存技術では協調可能な地理的範囲やモビリティに制限がある。そこで、ネットワーク制御のみでは実現できない通信品質を、ネットワークとアプリケーションおよびユーザーとの共創によりシステムレベルで実現することを考える。

筆者らは、これまでにサイバー・フィジカルシステム (CPS) を対象として、Control of Networks (ネットワークの制御) 技術と Control over Networks (ネットワークを介した制御) 技術の検討を行ってきた [3]。CPSにおけるシステムレベル品質として QoP (Quality of Performance) を定義し、一定レベルの QoP を担保するようにネットワーク制御およびアプリケーション制御を行うことで、所望のシステムレベル品質を実現している。さらに近年は、サイバー空間の計算資

源、物理空間のセンサとアクチュエータに加えて、システムに内在する人の行動や社会的つながりといった人・社会空間を考慮したネットワーク制御およびアプリケーション制御に興味を持って取り組んでいる。このようなシステム概念はサイバー・フィジカル・ソーシャルシステム (CPSS) と呼ばれている [4]。日本が Society 5.0 で実現を目指している CPS により実現される人間中心の社会はまさに CPSS の概念そのものである。CPSS においても同様にシステムレベル品質を定義することができ、特にユーザーが体感する品質を QoE (Quality of Experience) と呼ぶ。QoE はこれまでも音声品質や映像品質を評価する指標として用いられているが、これらのアプリケーションに限らずユーザーが享受するあらゆるサービスのシステムレベル品質としても定義することができる。

本稿では、QoP および QoE を考慮したネットワーク化制御システムを例に挙げて、制御性能やユーザー満足度等のシステムレベル品質を担保するためのシステム制御技術を紹介する。また、人の行動や社会的つながりを活用してより高度なシステムレベル品質を目指す共創型 CPSS の実現に向けた展望を述べる。

## QoP を考慮した遠隔ロボット制御

QoP を考慮したネットワーク化制御システムの例として、フィードバック型の遠隔ロボット制御を取り上げる。フィードバック型の遠隔ロボット制御システ

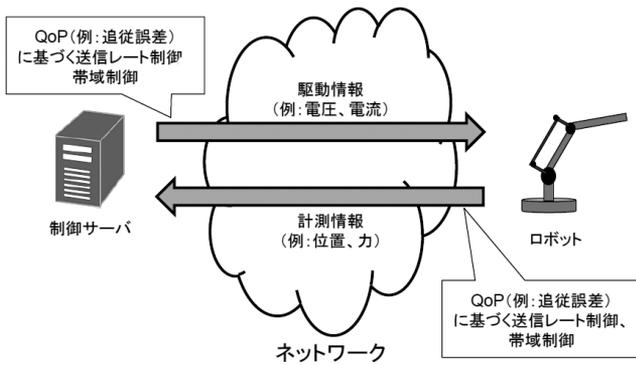


図1 QoPを考慮した遠隔ロボット制御

ムでは図1に示すように、制御サーバとロボットがネットワークを介して接続され、制御サーバとロボットとの間でアクチュエータへの駆動情報とセンサからの計測情報がやり取りされる。制御サーバにはフィードバック制御器が搭載され、目標値と計測情報に基づいて駆動情報が計算される。例えば、ロボットの位置制御において、ロボットの関節モータを駆動する場合は、位置（角度）目標値と位置（角度）計測値の誤差をリアルタイムに計算し、それらの情報をもとにモータに入力する電圧値や電流値を計算することになる。

筆者らは、遠隔ロボット制御システムにおいて、制御性能である追従誤差をQoPと定義し、QoPを一定レベルに維持しつつ、送信データ量を削減することで、ネットワークインタフェースの消費電力やトラフィック量を削減する技術を提案している [5]。提案手法は、追従誤差があるしきい値を下回った場合にデータ送信を停止し、しきい値を上回った場合にデータ送信を再開する。提案手法を用いない場合は、1ミリ秒周期で制御サーバとロボットとの間でデータが送受信されている。提案手法を用いることで、過渡状態における制御性能を担保しつつ、定常状態のトラフィック量を80%程度削減できることが確認できた。また、QoPに基づき帯域制御を行うことで、無線ネットワーク化制御システムにおける競合アクセス環境でも、各ロボットの応答特性に応じた帯域割り当てを実現し、制御性能を一定レベルに維持することができた [6]。

### QoEを考慮した映像ストリーミング

QoEを考慮したネットワーク化制御システムの例として、適応ビットレート制御を用いた映像ストリーミングを取り上げる。適応ビットレート制御を用いた映像ストリーミングシステムでは図2に示すように、

ネットワーク状況に応じて適切な映像ビットレートを選択することで、フリーズ等の発生頻度を減らしてユーザ満足度を向上させている。このような仕組みはABR(Adaptive Bit Rate)と呼ばれているが、スループット推定の精度の影響を受ける。そこで、映像ストリーミング方式の1つであるMPEG-DASH (MPEG-Dynamic Adaptive Streaming over HTTP)において、端末側の再生バッファの状態のみに基づいてABR制御を行う手法が提案されている [7]。

筆者らは文献 [7] の手法を改良し、フリーズ時間に加えてビットレート変動にも着目した再生バッファレベルの安定化制御によりQoEを向上させる手法を提案している [8]。ここで、再生バッファレベルを再生バッファに蓄積されている映像データの再生時間と定義する。本手法はシステムレベル品質であるQoE情報を再生バッファレベルとして間接的にフィードバックすることでQoEの安定化を図るものである。また、QoEの直接的フィードバックまたは事前のモデル化により、各ユーザの嗜好に応じた帯域割り当て制御を実現する手法も提案している [9]。本手法は映像ストリーミングシステム以外にもWebブラウジングシステムへの適用も検討している [10]。QoE情報の直接計測には様々な方法が考えられるが、ユーザのクリック動作等によるアンケート回答では計測周期が長くなり、心拍情報等による自動測定ではQoEマッピングが難しいという課題がある。さらに、人の心理状態や意思を何らかの形でアプリケーションおよびネットワーク側にフィードバックすることでより効率的なシステム設計、制御が可能になると考えられる。

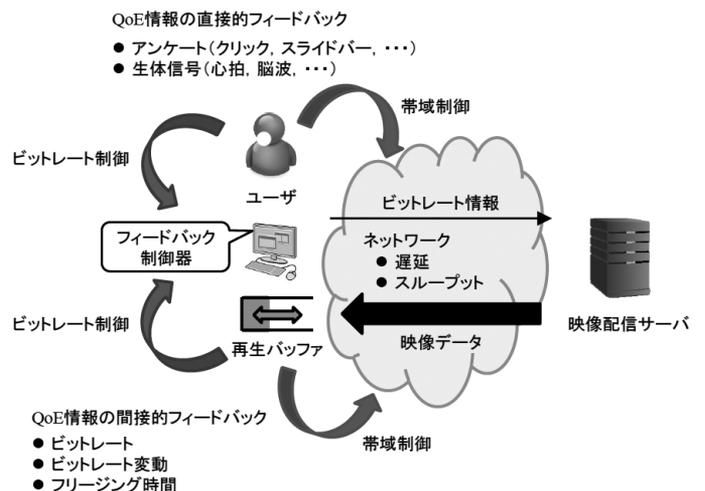


図2 QoEを考慮した映像ストリーミング

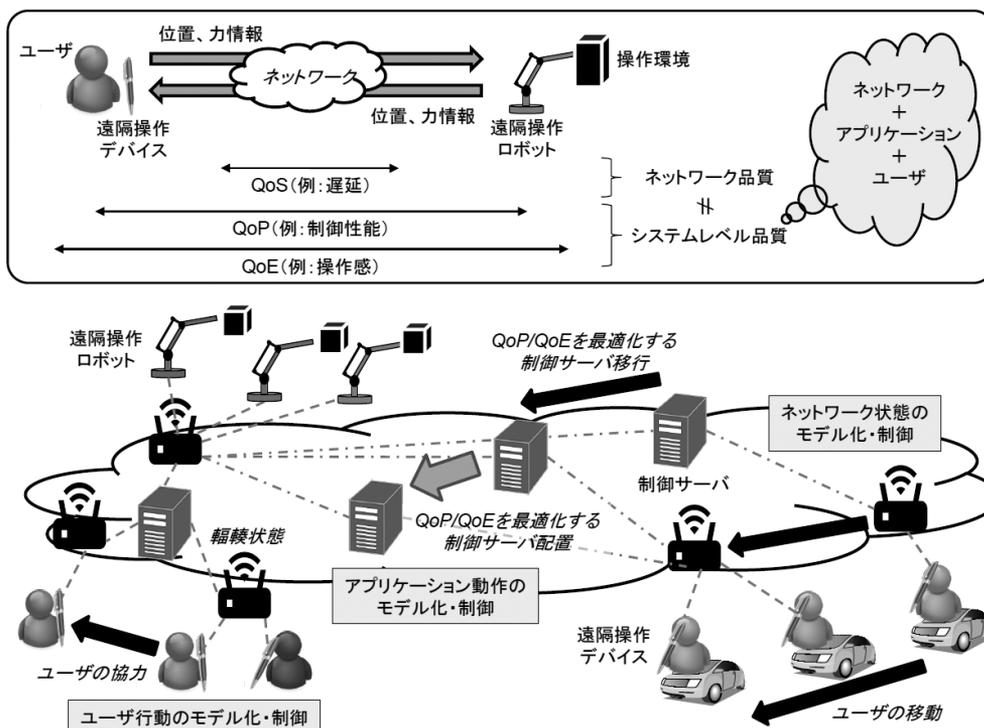


図3 共創型 CPSS としての力触覚通信システム

### 共創型 CPSS

Beyond 5G/6G 時代には、超低遅延化を目的とした MEC から、ネットワークとアプリケーションおよびユーザーが共創して所望のシステムレベル品質を達成する CMAC (Co-created Multi-access Anywhere Computing) へ移行していくことが予想される。CMAC を導入した共創型 CPSS の一例を図3に示す。図3は遠隔操作ロボットを用いて力触覚通信を行うシステムであり、ユーザーは遠隔操作デバイス进行操作し、遠隔地のロボットがそれに同期して動作する。遠隔操作ロボットが何かに接触すると反力がユーザー側にフィードバックされる。つまり、遠隔環境を直接触っているかのように感じることでできるシステムであり、Beyond 5G/6G 時代の有望なアプリケーションとして期待されている。

前述した QoP および QoE の概念を力触覚通信に適用すると、QoP は位置や力の制御性能として、QoE は実際にユーザーが遠隔環境をどのように感じているかという操作感として表現することができる。QoP や QoE といったシステムレベル品質は遅延等の QoS (Quality of Service) で表現されるネットワーク品質とは必ずしも一致しない。システムレベル品質は QoS に加えて、アプリケーションの動作やユーザー行動に影響を受けることになる。例えば、ユーザーとロボットと

の間の制御サーバの最適配置は QoS のみに依存するものではなく、ロボットの制御アルゴリズムやユーザーの心理状態等にも依存する。また、ユーザーが移動している場合には、アプリケーションの連続性を考慮して制御サーバを移行する技術も必要となる。さらに、ネットワークが輻輳状態である場合にはユーザーに何らかのインセンティブを与えて、混雑していないアクセスポイントへ移動してもらい、輻輳状態を回避して通信品質を改善することができる。このように共創型 CPSS では、ネットワーク、アプリケーション、ユーザーのモデル化を統合的に行い、システムレベル品質に基づいて各サブシステムの制御を連携させて行う必要がある。

### おわりに

本稿では、システムレベル品質として QoP および QoE を考慮したネットワーク化制御システムを紹介し、共創型 CPSS の実現に向けた展望を述べた。Beyond 5G/6G 時代には、ネットワークの物理的制約を超える通信品質が求められる可能性がある。ネットワーク、アプリケーション、ユーザーの連携により、要求品質をシステムレベルで評価、制御するアーキテクチャが必要とされている。

我々の生活の中で、あらゆるサービスにおけるユーザの満足度がリアルタイムかつ定量的に計測、評価できるようにになれば、ユーザの個別の嗜好に合わせた情報提供やシステムの制御が可能となる。また、共創型 CPSS の実現に向けては、人と機械の相互作用、環境負荷、効率性等を考慮したシステム全体の最適化が必要であり、分野間の障壁を乗り越えて、あらゆるシステムの統合設計を可能とするオープンな CPSS プラットフォームの構築が課題である。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K11275「情報通信と制御の融合によるサイバーフィジカル ICT 基盤の構築」および 18H03236「ユーザコンテキスト適応型ネットワーク設計・制御手法の確立」の成果を含んでいる。

### <参考文献>

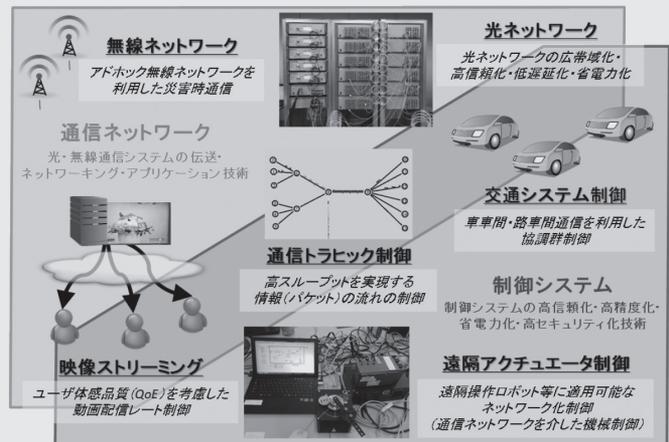
- [1]ITU-T Technology Watch Report, "The Tactile Internet," Aug. 2014.
- [2]A. Aijaz and M. Sooriyabandara, "The Tactile Internet for industries: A review," Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 2, pp. 414-435, Feb. 2019.
- [3]久保亮吾, "通信工学と制御工学の融合 —Control of Networks と Control over Networks—," 電子情報通信学会誌, vol. 100, no. 11, pp. 1316-1320, Nov. 2017.
- [4]Y. Zhou, F. R. Yu, J. Chen, and Y. Kuo, "Cyber-physical-social systems: A state-of-the-art survey, challenges and opportunities," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 22, no. 1, pp. 389-425, First Quarter 2020.
- [5]T. Yamanaka, T. Iwai, and R. Kubo, "Quality of performance aware data transmission for energy-efficient networked control," IEEE Access, vol. 9, pp. 5769-5778, Jan. 2021.
- [6]T. Iwai, D. Kominami, M. Murata, R. Kubo, and K. Satoda, "Mobile network architectures and context-aware network control technology in the IoT era," IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 10, pp. 2083-2093, Oct. 2018.
- [7]W. Huang, Y. Zhou, X. Xie, D. Wu, M. Chen, and E. Ngai, "Buffer state is enough: Simplifying the design of QoE-aware HTTP adaptive video streaming," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 64, no. 2, pp. 590-601, Jan. 2018.
- [8]R. Sakamoto, T. Shobudani, R. Hotchi, and R. Kubo, "QoE-aware stable adaptive video streaming using proportional-derivative controller for MPEG-DASH," IEICE Transactions on Communications, vol. E104-B, no. 3, pp. 286-294, Mar. 2021.
- [9]阪本竜太, 久保亮吾, "MPEG-DASH におけるユーザ嗜好度を考慮した動的帯域制御," 電子情報通信学会技術研究報告, コミュニケーションオリティ, vol. 120, no. 314, CQ2020-65, pp. 27-31, Jan. 2021.
- [10]田島佳祐, 阪本竜太, 堀地亮佑, 松田崇弘, 久保亮吾, "Web ブラウジングにおける QoE 変動を考慮した待ち時間制御," 電子情報通信学会技術研究報告, コミュニケーションオリティ, vol. 120, no. 76, CQ2020-16, pp. 77-82, Jun. 2020.

## 慶應義塾大学理工学部 電気情報工学科 久保研究室

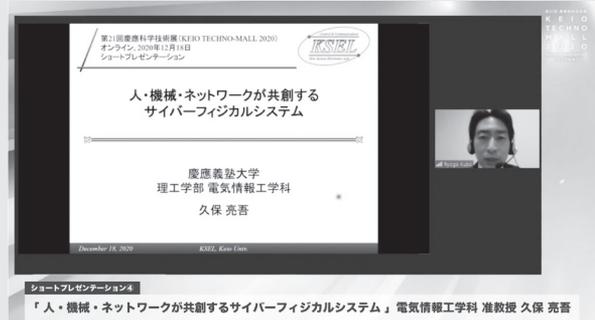
慶應義塾大学理工学部では、2020年4月に電気情報工学科が誕生した。これは、これまでの電気電子分野におけるハードとソフトの融合を目指した旧電子工学科での教育研究に加えて、プログラミング、機械学習等の情報系教育をさらに充実させることを目的とした学科名称変更である。久保研究室は本学科における情報系研究室の1つとして、サイバー空間とフィジカル空間をつなぐ情報通信・計測制御技術の教育研究、および電気・電子・情報分野の既存の枠組みに捉われず未来社会を創造できるシステムインテグレータとしての視点を持った人材の育成に取り組んでいる。

現在の研究室構成は教員1名、後期博士課程1名、修士課程5名、学部5名である。これまでに、アーヘン工科大学およびマドリード工科大学からのダブルディグリー学生(修士課程)や在職ドクターを受け入れているほか、現在はロボティクスに関する修士課程のダブルディグリープログラム「Japan-EU 高度ロボティクスマスタプログラム (JEMARO)」(<https://jemaro.st.keio.ac.jp/>)にも参画しており、多様なバックグラウンドを有する学生の受け入れを積極的に行っている。

当研究室ではネットワーク化したあらゆるシステムの通信・制御技術を取り扱っており、適用範囲は情報通信、機械、電力、交通など多岐にわたる。近年は、光・無線アクセスネットワークのリソース管理や QoS 制御をはじめとしたネットワーク品質制御技術、ロボットや自動運転車両などのネットワーク化制御システムにおける省電力化・セキュリティ技術、ユーザ体感品質を考慮したネットワークアプリケーション技術の研究開発に注力している。<http://www.kbl.elec.keio.ac.jp/>



久保研究室の研究領域



KEIO TECHNO-MALL 2020 ショートプレゼンテーションでの講演の様子

# AIを活用した手術動画の記録と解析

～ マルチカメラ搭載型无影灯による直視下手術の多視点撮影映像の利用 ～

手術に使われる「无影灯」は、取り付けられている複数の光源のいずれかが外科医の体や頭に遮蔽されずに手術の術野を照らし続けることにより影をなくした照明装置である。この无影灯に複数のカメラを取り付け、いずれかのカメラが術野を遮蔽なく撮影可能であることを利用して、AIにより遮蔽の無いカメラを自動的に選択することにより術野を撮影し続けることを実現したシステムを紹介する。さらに、手術工程の知的理解と記録のための手術映像認識にAI技術を利用した例を紹介する。



マルチカメラ搭載型无影灯による遮蔽の無い手術映像記録システム

慶應義塾大学  
理工学部 情報工学科  
斎藤 英雄

## はじめに

手術の記録は、教育、手術技術の共有化、症例研究、治療の評価など、様々な理由から欠かせない作業である。近年発展してきた内視鏡手術や顕微鏡下手術では、カメラに術野を撮影して記録することは容易である。しかし、一方で、いまだ多くの外科領域では外科医の直視下で手術が行われている。この場合、冒頭の図に示すように、手術現場の周囲には複数の医師がいるため、カメラで手術現場を撮影することは困難である。そこで、手術場の真上に設置されたカメラが記録に適していることが前提となるが、このようなカメラは外科医の手術動作の邪魔になるため、ほとんどの場合、このような記録用カメラを設置することはできていない。また、仮に設置したとしても、外科医の頭や体により頻繁に遮蔽されてしまい、継続的に術野を撮影し続けることはほぼ不可能である。

内視鏡や顕微鏡による手術（鏡視下手術）では、術野をカメラで撮影することが前提となっているため、術野を撮影した画像に対して深層学習等のAI技術を適用して診断支援を行うことは盛んにおこなわれ、コ

ンピュータ外科学の貢献によってこのような鏡視下手術はますます安全で高度な医療となってきた。実際には撮影が困難な直視下手術のカメラ撮影が可能になれば、同様に直視下手術の高度化を実現することが可能となる。

これを可能にするために、慶大医学部形成外科の医師である梶田大樹特任助教は、无影灯（影が少なくなるように多方向から手術野を照らすための複数の電球を持つ）に注目した。これは、外科医等の遮蔽があっても、複数の電球のうち少なくとも1つが常に手術野を照らすことを可能とする照明である。この電球と同様に、无影灯の照明ユニットごとにカメラを取り付けて多数のカメラで同時に撮影することにより、照明により術野が照らされている限り、多数のカメラのうちのいずれかが術野をキャプチャできているというわけである。

この基本アイデアをベースに、梶田医師は理工学部の筆者らと共同で、マルチカメラ搭載型无影灯を提案・試作し、実際の手術での利用を試みている。これにより撮影されるのは、同時に5つの異なる視点からの映

像であり、これらの一部は術野が遮蔽されるが、少なくとも1台のカメラは術野を撮影し続けることができている。

本稿では、マルチカメラ搭載型無影灯により撮影されるマルチカメラ映像から、外科医の頭や体による遮蔽の無いカメラをAIにより自動的に選択して切り替えることにより、直視下手術においても外科医による遮蔽無に術野を継続して撮影することを可能にするための技術について紹介する。さらに、このようにして撮影された映像を利用して、手術中の動作や手術に使う器具を自動認識するための手法について紹介する。このような自動認識の実現により、手術工程の自動的な記録・言語化を行うことができ、さらに記録した映像から必要な部分を簡単に検索することなどが実現可能であり、手術の記録映像の新しい利用価値をも創出できる。

### マルチカメラ搭載型無影灯

マルチカメラ搭載型無影灯を用いることにより、いずれかのカメラには術野が撮影されることになるが、複数の映像を同時に見ることは困難である。そこで、マルチカメラ映像のうち、術野が適切に撮影されているカメラを自動選択して切り替えることにより、結果的には1本の映像として出力することが重要となる。

#### (1) AIによる術野の検出に基づく自動切替

手術を撮影した映像に対して、術野領域を手動により指定（アノテーション）した映像を教師データとする機械学習 [1] により、手術映像から術野領域を自動検出することにより術野の遮蔽度を数値化し、遮蔽

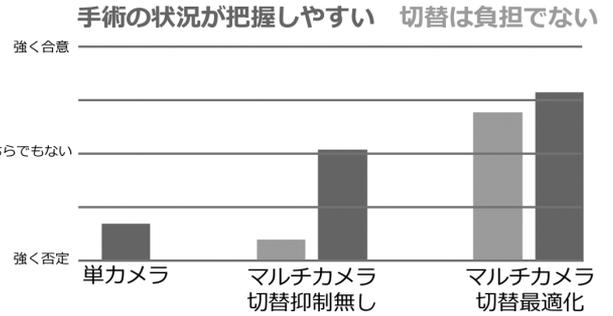


図2 13名の医師による主観評価結果

が最小となるカメラを自動選択する手法（図1）を考案した [2]。

学習データとは異なる未知の手術であっても、ほとんどの手術で実用的な映像選択の性能が得られたが、全タイムフレームで比較を行うと、スコアが拮抗したときに映像が激しく切り替わるため、視聴の質（Quality of View: QoV）が低下する。そこで我々は最短経路問題を解くためのアルゴリズムであるダイクストラ法を応用して、事前指定した最小フレームではカメラの切り替えを行わず、映像全体で観測される術野の面積が最大になるように切替抑制するための切替最適化を行うことにより QoV の低下を防止している（図2）。

本手法によって、QoV の保たれた視点切替動画が自動で作成され、手術開始から終了までの術野の一連の状況が、多くの手術において遮蔽なく観察できる映像として記録することが可能となった。

#### (2) 教師あり深層学習を利用した選択

上記の手法では、術野領域の教師データを得るためのアノテーション作業に大きな手間がかかることと、この作業の正確さが、機械学習による術野領域の推定精度に大きな影響を与えるという課題があり、また切替頻度のパラメータの調整にも手間を要した。そこで、映像から術野領域を指定するのではなく、マルチカメラ映像を外科医が見ながら適切な映像を選択するアノテーションを施した教師データを用意して、深層学習を利用して映像データの入力に対して各映像が選択される確率を出力する回帰モデルを作成した。このとき、選択されなかった他の4視点の映像の特徴も global feature として活用し、各カメラとの空間的な関係性も考慮した学習がなされるように工夫した。また BiLSTM (bidirectional long-short term

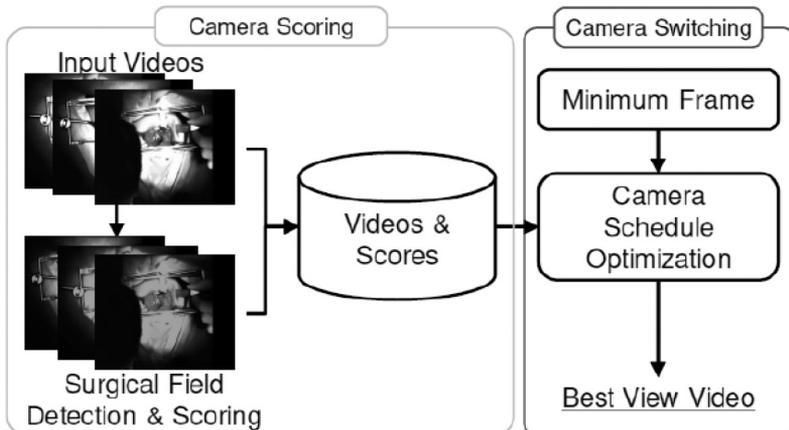


図1 遮蔽が最小となるカメラの自動選択法。入力ビデオからAIにより術野を検出し遮蔽度を数値化（図左）し、カメラを自動選択する（図右）。

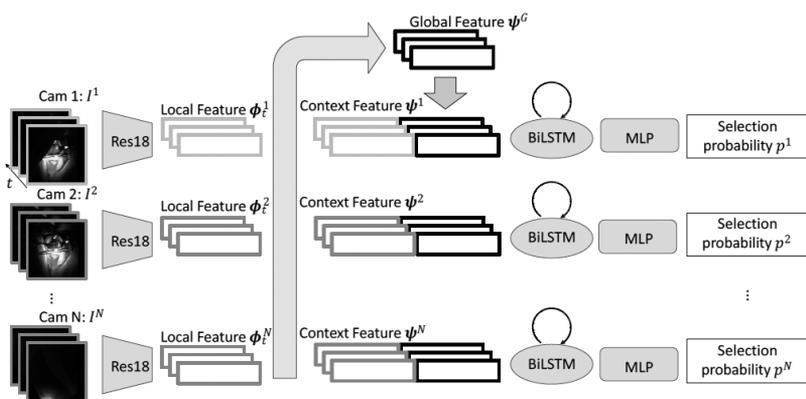


図3 外科医の選択による教師データを用いた深層学習

memory) を用いて時系列も考慮した学習を行った (図3)。これにより、教師データと類似した手術であれば、術野の検出や切替頻度の調整をせずとも、QoVの保たれた自動切替映像を作成することができた [3]。

### 手術映像からの作業認識のための AI 技術

AIにより術野の状況をコンピュータが認識することにより、手術工程を自動的に言語化・構造化できるので、術後の手術作業の確認や検討をより効果的に行うための基礎データを提供することが可能になると期待されている。このように手術の映像記録の新しい価値を創出可能な画像認識技術の一例として、手術で使われる器具の検出と分類技術 [4] を紹介する。

多種多様の直視下手術においては、使用される術具

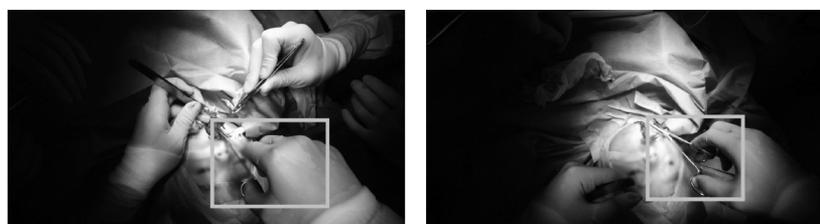


図4 眼科用剪刀 (左) と Webster 持針器 (右)

表1 画像認識だけの場合 (only Faster R-CNN) や手の動き認識だけの場合 (only hand) に比べ、両者を利用した提案手法が術具の認識精度が上回っている

認識手法	正解率	再現率	適合率	F 尺度
提案手法	0.895	0.810	0.981	0.888
術具の画像認識 (Faster R-CNN) のみ	0.663	0.811	0.970	0.883
手の動き認識のみ	0.524	0.559	0.230	0.326

も多種多様である。中には、Webster 持針器と眼科用剪刀のように、使用される目的は異なるのに形状は類似している術具も含まれている (図4)。通常の物体検出のモデルを適用しても、これらの術具を精度良く分類することは困難である。また、腹腔鏡下手術などと同様に術具の先端は患部に隠れる場合があり、また直視下手術においては術具の把持部は外科医の手によって隠れてしまうという課題もある。

コンピュータが縫合や糸切りなどの外科医の行動を正しく判別するためには、形状の似た機能が異なる術具であっても、正しく分類できる必要がある。我々は、これらの術具が用いられるときには、外科医の手の使い方が異なることに着目した。すなわち、縫合中の持針器は手を回転させるようにして用いられるのに対し、剪刀が用いられる際には回転のような動作はほとんど見られない。術具の判別の際に、術後を把持する手の動きの情報も考慮した学習を施すことによって、術具の画像認識だけを用いた場合よりも、高い精度で術具の認識が可能になることを示した (表1)。

### おわりに

本稿で紹介した技術以外にも、医師の頭部に取り付けたカメラと、医師の視線を計測する装置を組み合わせた手術記録・解析用 AI の研究を医工連携チームで実施している。今後も引き続き画像認識・センシングを利用した新しい技術を提案し医療の進歩に少しでも貢献できれば幸いである。

#### <参考文献>

- [1]Cheng Li, Kris M Kitani, Pixel-level Hand Detection in Egocentric Videos, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2013), pp. 3570-3577, 2013
- [2]Tomohiro Shimizu, et al., Surgery Recording without Occlusions by Multi-view Surgical Videos, 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, VISIGRAPP 2020, pp. 837-844, 2020.
- [3]Ryo Hachiuma, et al., Deep Selection: A Fully Supervised Camera Selection Network for Surgery Recordings, MICCAI 2020, LNCS vol 12263, Springer, 2020
- [4]Tomohiro Shimizu, et al., Hand Motion-Aware Surgical Tool Localization and Classification from an Egocentric Camera, Journal of Imaging, 7(2), 15, 2021.

慶應義塾大学理工学部 情報工学科 斎藤英雄研究室

カメラとコンピュータにより人間の視覚機能を実現しようとする「コンピュータビジョン」に関する研究を行っている研究室である。20年以上前に、斎藤英雄が米国カーネギーメロン大学（CMU）に留学し、金出武雄教授のご指導のもとで行った Virtualized Reality という研究で、人間の動作等の動きのあるシーンを囲む多数のカメラで撮影した多視点映像から対象シーンの3次元形状を推定し、推定された3次元形状を利用することによって空間の任意の位置で観察した映像を生成できることをいう基本コンセプトを示した。既にこの時点で、同様の技術を利用することにより手術を多視点カメラで撮影して任意視点から手術を観察できるようにするといった利用法も金出教授により提案されていた。その後20年が経過した今、そのコンセプトを実現したシステムが本稿で紹介しているマルチカメラ搭載型無影灯である。

2017年に梶田医師から相談を受けた当初は、「Virtualized Reality を手術に使い自由視点で再現して手術の記録に役立てる考えは20年前に示されているので今更意味がない。」と言って、20年前に金出先生から頂いたポンチ絵を示した。それには、私が20年前に構築したような、天井や壁に大量にカメラを設置した部屋で手術するという絵が描かれていた。しかし、実際それを実現したところで、本稿に述べたように、その絵に描かれているような天井や壁に設置したカメラからは術野が撮影されようがないのである。

また、「好きな視点で撮影するだけなら、手術をする医師の頭部にカメラを付けておけば良いのでは」と提案したところ、実際の手術では、医師は色々なところを見るために頭部を想像以上に早く動かしながら手術することもあり、そのような映像では何をやっているのか実際にはわからず使い物にならない、とのことであった。

つまり、梶田医師の提案である「無影灯に取り付けたマルチカメラ」というアイデアが、20年の時を超えて金出先生のコンセプトと結びついたことが本稿のマルチカメラ搭載型無影灯を実現させたのである。

さて、私の研究室で行っている研究の一つに、「隠消現実感」というテーマがある。これは、現実シーンを撮影した画像に、CG物体等を仮想的に重畳表示する「複合現実感・拡張現実感」とは逆に、現実シーンを撮影した画像から、不要な物体を仮想的に除去して表示する技術である。その実例を図6に示す。ここでは、作業道具（ドリルと手）で隠れてしまう対象物体を作業中に見るために、作業道具を除去した画像を生成している。

この技術のポイントは、画像から除去したい物体の裏側で隠されているエリアの画像の再現手法となる。ここでは、作業者とは別の視点に設置したカメラによって隠されているエリアを同時に撮影し、その映像を作業者の視点に変換するために前述の Virtualized Reality の技術を適用している。

現在、本稿で紹介した手術映像に対して、この隠消現実感技術を適用する研究を進めている。これにより、図7に示したコンセプト画像のように、術者の手等を「透視」した映像を生成することも実現したいと考えている。

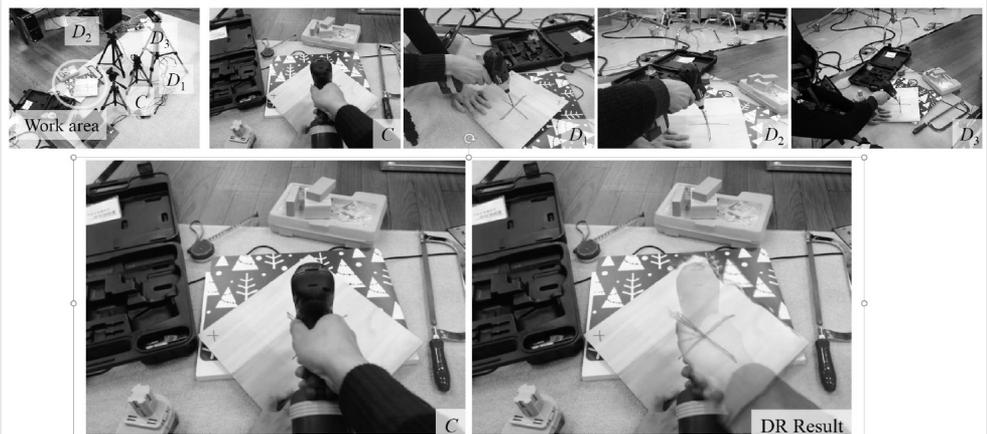


図6 上段に示した多視点画像から、下段右のようにドリルと手を透視可能な画像を生成している例

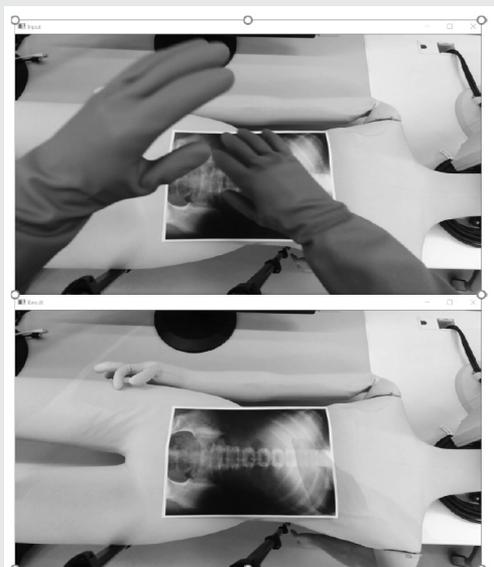
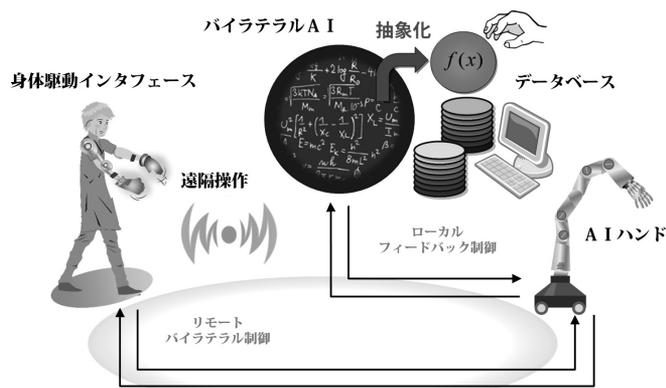


図7 手術において手を透視するコンセプト実験の例。ここでは、手で隠されていない瞬間のフレーム画像を利用して手の部分を消して置き換えている。

# ネットワーク身体拡張のための AIハンドインタフェース

20 世紀においてオーディオ・ビジュアル技術が飛躍的な発展を遂げ、IT 革命がそれをさらに加速させてきた。このことはまさに人類が空間を自在に越えて視聴覚を持つことを意味している。今後の超高齢化社会における人にやさしい ICT の実現を考えると、より人間の根源的な感覚である触覚伝送に基づいたインフラ整備が必要不可欠であり、緊急に取り組むべき課題となっている。そこで、慶應義塾大学理工学部桂研究室では、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業を受け、ネットワークを介して人の身体性を拡張する「ネットワーク身体拡張」のための AI ハンドインタフェースの開発研究を進めている。本稿では、本研究による AI ハンドインタフェースを構成する要素技術について紹介する。



「ネットワーク身体拡張」の概念図

慶應義塾大学  
理工学部 システムデザイン工学科  
桂 誠一郎

## ネットワーク身体拡張

近年、ネットワークの高速化・広帯域化に伴い、ロボットを介した遠隔操作の研究が多く進められている。マスタースレーブ機構<sup>\*1</sup>を用いたバイラテラル制御<sup>\*2</sup> [1] は遠隔地からの触覚フィードバックを可能にしているが、通信遅延がフィードバックループに含まれる場合、システム全体の安定性の確保が課題となる。さらに、接触は物理的な作用・反作用の法則に支配されるため、制御系においてたとえ僅かであっても遅れは許されない。制御系においてミス予測器や位相制御を導入することにより、安定性の向上は見込めるが、制御系全体の周波数帯域が狭まり、結果として操作感が重たく、触覚フィードバックも鈍いものに限られていた。

本研究では、遠隔操作システムの安定かつ広帯域化による「ネットワーク身体拡張」の実現を目的とし、多重フィードバックループ構成の制御系を構成する。まず、環境との物理的な相互作用を行うローカルサイドにおいて、安定な接触動作を担保するためのローカルフィードバック制御を構成する。ローカルサイドに

<sup>\*1</sup>操作者が動かすマスタシステムとマスタの動作に同期して追従するスレーブシステムの一式からなる遠隔操作システムのこと。

<sup>\*2</sup>マスタースレーブ機構の間で力触覚を双方向に伝送するために用いる制御のこと。マスタシステムとスレーブシステムの間で人工的に作用-反作用の法則を実現するための力制御ならびにマスタシステムとスレーブシステムを同期させる速度制御を同時に満たす必要がある。

におけるロボットハンドには、安定な接触を実現する力制御系を基本とし、さらに AI により適切な動作修正を図る。AI には独自開発の「バイラテラル AI」と呼ばれる手法を導入する。

リモートサイドへの触覚フィードバックのためにリモートフィードバック制御を構成し、操作者の意図を反映させることが可能なシステムとする。また、操作者が使用するインタフェースには機能的電気刺激を用いる。従来のアクチュエータベースの外骨格システムと異なり、筋肉を動かすための神経に刺激を与える方法であるため、安全面での向上も期待できる。

このような、多重フィードバックループ構成の制御系により「AIハンドインタフェース」を実現することができ、安全かつ操作性の高い遠隔操作を可能にする。

## AI ハンド

本研究では、人間の動作を代替する「AI ハンド」として、器用で繊細な力加減を制御できるロボットハンドを開発している。「AI ハンド」の指の機構を図 1 に示す。

開発したロボットハンドの指は、バネと腱駆動により動作される。特に、指先の DIP 関節<sup>\*3</sup>を直接駆動

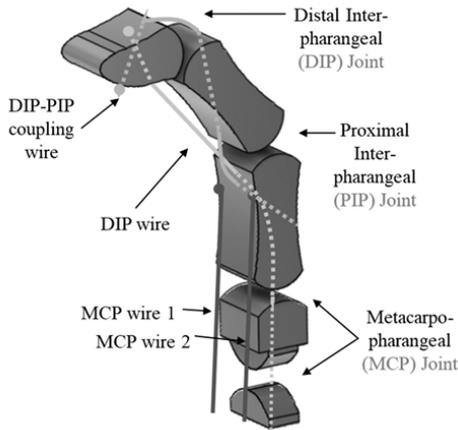


図1 AIハンドの指の機構

することで、バックドライバリティ（逆駆動性）の高い動作の実現につながる。腱は3個のアクチュエータを接続することで、DIP関節\*3、PIP関節\*4、MCP関節\*5をそれぞれ独立に駆動することが可能である。また、図2に示すように、試作したAIハンドの器用さの確認として、ボールを指先で転がす動作を行った。DIP関節を直接駆動できるため、従来のハンドよりも指先の器用さを向上することが可能である。

### バイラテラル AI

本研究では、株式会社東京自働機械製作所と共同で、人と対話的に設計可能な人工知能「バイラテラル AI」の基盤技術の開発に成功した [2]。現在利用が進んでいる一般的な人工知能技術は、計算過程の物理的意味の解釈が困難であり、生成されたモデルがブラックボックス化されてしまうという問題点がある。「バイラテラル AI」は、図3に示すように設計者があらかじめ用意した要素群を用いて最適化を行う手法であり、AIによる演算結果を随時確認しながら対話的にモデルを生成することが可能である。対話的な設計を行うことで、これまでに人間の培ってきた「知識・経験・技能」とAIの「大規模・高速演算力」の効果的な協働が可能になる。そのため、人間の暗黙知、経験則や

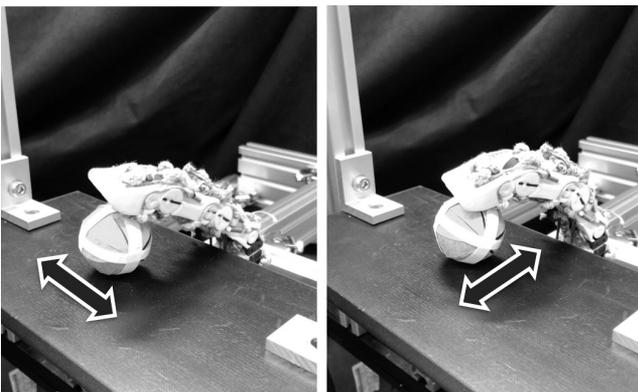


図2 AIハンドの指先によるボールのマニピュレーション

\*3Distal Interphalangeal Joint：指の第一関節

\*4Proximal Interphalangeal Joint：指の第二関節

\*5Metacarpophalangeal Joint：指の第三関節

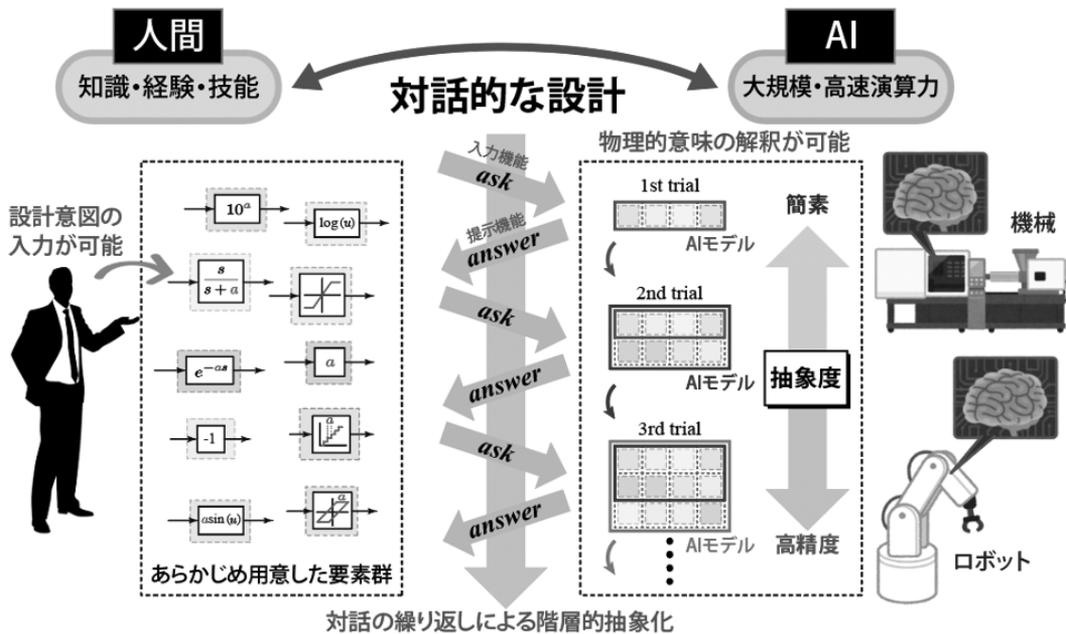


図3 「バイラテラル AI」による対話的設計

熟練技能等を物理的意味が明確な数式に基づく形でモデル化することができ、ノウハウデータベースやスキルデータベースとして蓄積することができる。データベース化されたノウハウやスキルは、将来的なロボットや産業機械の作業領域拡大や、人材の育成・訓練などへの利活用が可能になる。

### 機能的電気刺激によるインタフェース

本研究では、操作者のインタフェースを図4に示すような機能的電気刺激を用いて、身体を直接駆動する点が特長である。従来の電磁アクチュエータに基づく外骨格システムは自由度を増やすごとにアクチュエータの数が増加し、機構そのものが大変大がかりなものとなるため、繊細なタスクを行う際の操作性の低下が問題視されていた。

機能的電気刺激とは、運動神経に活動電位を供給することで筋収縮を誘発し、運動を生成することを可能

にする技術である。身体運動の補助に際して外部装置からの物理的な作用が必要なく、使用者が運動に際して自己主体感を得やすいという利点がある。

これまでの研究において、FPGA (Field-Programmable Gate Array) を用いた波形生成器を設計し、図5のようになめらかな電流を印加する機器の設計を行ってきた。その結果、電流印加時の痛みや長時間使用時の疲労が軽減されることを確認している。そのため、高速リアルタイム演算が可能な専用の制御システムにより印加電流の波形をきめ細やかに制御することで、機能的電気刺激による高分解能な運動制御が期待できる。

### おわりに

本研究で取り扱う「ネットワーク身体拡張」は、これまでの視覚、聴覚によるマルチメディアデータに加え、人間の動作という物理データベースとヒューマンインタフェースを融合させるもので、社会全体へ与える影響は大変大きい。特に、熟練技能者のスキル伝承や高度技能保存に基づいた次世代技術創成も視野に入れており、革新的な成果が期待できると予想される。さらに、熟練技能者の持つスキルやノウハウを解析して抽象化し、手づたえ教示の実現性を高めることが可能になるばかりではなく、リハビリテーション、医療・介護、スポーツ、芸術分野などの様々な分野において、効率的かつ遠隔でトレーニングを行うための支援サービスを提供することが可能になる。Beyond 5G、6G時代においては、人間動作データのモニタリング、データベース化、ロボットを介した利活用までの一連のシステムがサービスとして運用されることになるだろう。これは機械との融和に基づく人間の身体性の拡張・進化に他ならない。

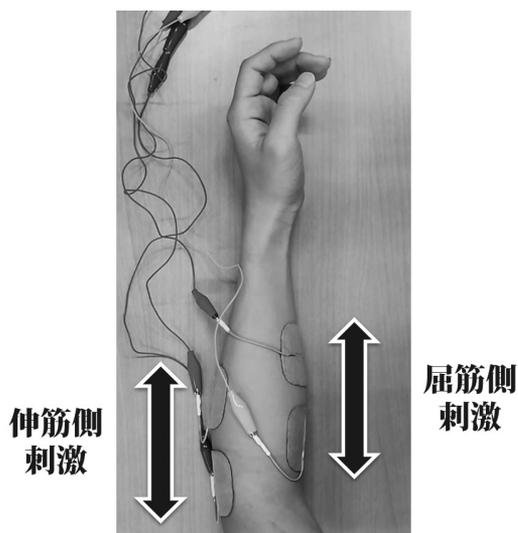


図4 機能的電気刺激装置

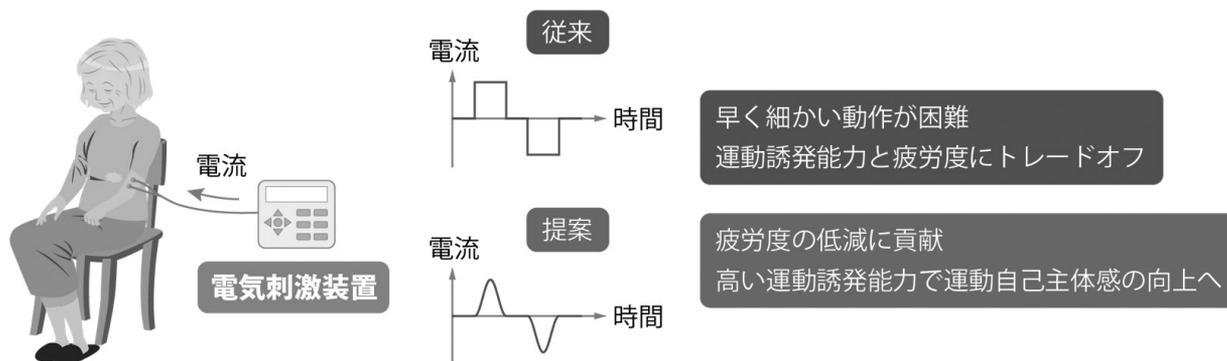


図5 機能的電気刺激装置から印加する電流パルスのなめらかさによる効果の違い

謝辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）（受付番号：201603011）によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

<参考文献>

- [1] W. Iida, K. Ohnishi: "Reproducibility and Operability in Bilateral Teleoperation," 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2004-Yokohama, pp. 217-222, March, 2004.
- [2] I. Takeuchi, S. Katsura: "Hierarchical Abstraction of Compensator for Reaction Torque Observer Based on Element Description Method," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, Vol. 2, No. 1, pp. 61-70, January, 2021.

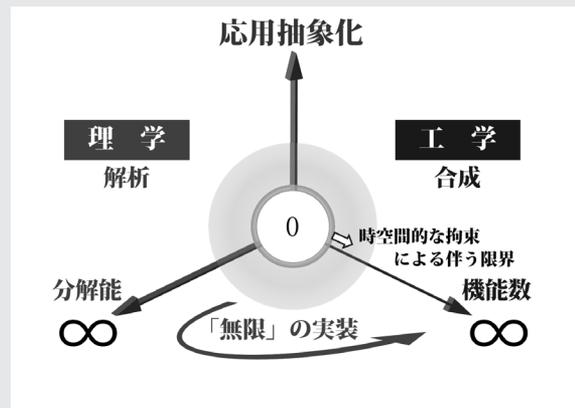
慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 桂研究室

学問は理学的視点と工学的視点に大別される。理学は自然現象を対象として、無限に細かく解析（アナリシス）を行う学問であるのに対し、工学は自然現象に人工物を付加し、機能の合成（シンセシス）を行う学問である。工学には実現可能な時空間が有限であるという制約が存在することから、本質を大胆に抽出するモデリングの簡略化が必要とされていた。しかしながら、超高齢社会における人間支援や介護・医療の充実化、防災・減災への取り組みなど、解決すべき問題が複雑化かつ複合化されており、簡略化モデルに基づいた手法では限界が来てしまっている。

桂研究室では、「応用抽象化と総合デザイン」を研究のキーワードとして、工学で実装可能な形でいかに複雑かつ多くの機能をシンセシスできるかといった新しい方法論を開拓するためのチャレンジを行っている。特に、「無限」を工学でシンセシスする新しい学理を明らかにすることが目的である。これまでに波動方程式によるモデル化に基づいた波動制御を提案し、時間遅れ要素のみを用いて無限階の微分操作を工学において実装することに成功している。波動制御は無限次元のダイナミクスを有しているため、特にこれまで取り扱いが困難であった高次共振系の安定化に効果があることを明らかにしてきた。

「応用抽象化と総合デザイン」に関して、これまで細分化されてきた各学術分野の架け橋となる新たな学術領域の創成を旨うことを目的とし、世界に先駆けて国際シンポジウムを開催した。また、慶應義塾とドイツアーヘン工科大学の連携協定の下で、桂研究室出身者がポスドクとして派遣されており、国際共同研究による世界展開を進めている。

研究の源泉は研究室メンバー個々の持つオリジナリティである。所属学生の研究テーマは、個人ごとの興味に基づいたものになるように決定がなされている。それは、学生自身が「面白い」と思う気持ちに勝るものはないと確信しているからである。研究成果が世の中に少しでも貢献できるよう「常に楽しく！全力で！！」をモットーに、新しいことへのチャレンジと努力を続けたい。



「応用抽象化と総合デザイン」の概念図



桂研究室メンバー全員でのディスカッション

# 医療・ヘルスケア・コミュニケーションの 理工学

～ マイクロ・ナノデバイスが可能にする新技術 ～

微細加工技術を駆使したマイクロ・ナノデバイスは、その小ささを活かして、埋植、装着、貼付けが可能であり、特に、医療、ヘルスケア、コミュニケーション分野での応用が期待される。本稿では我々の研究グループが取り組んでいる人工臓器、生体モニタリングデバイスについて紹介する。

慶應義塾大学  
理工学部 機械工学科  
三木 則尚



インプラント人工腎臓プロトタイプ

## はじめに

マイクロ・ナノメートルスケールでの現象解明、これと微細加工技術を用いたマイクロ・ナノデバイスの積極的な利用が、医療、ヘルスケア、ICT、自動車など、様々な分野で積極的に進められている。一般社団法人日本機械学会内でも、マイクロ・ナノ工学部門が21番目の部門として、2016年に正式部門と認められた。筆者の研究室では、その小ささを活かしたインプラントや、ウェアラブル可能なデバイス、さらにそれを活用した応用研究を行っている。本稿では、透析患者のQOLを劇的に改善するインプラント人工腎臓、ヒトの状態をモニタリングするためのウェアラブル脳波電極ならびに笑顔検出電子タトゥーについて紹介する。

## インプラント人工腎臓<sup>[1]</sup>

日本国内の慢性腎不全患者は8人に1人に上ると言われ、そのうち重度であり、透析治療を受けている患者は2020年現在33万人を超えている。透析治療では、本来腎臓が担っていた除水、老廃物の除去、電解質濃度の調整を、ダイアライザーと呼ばれる装置内で、透析膜を介して限外濾過ならびに拡散により行っている。実は、現在の血液透析療法はほぼ完成の域に達しているといわれ、適切に血液透析を行っていれば腎臓

病で亡くなることはないといわれている（死亡の主要因は心不全、感染症、悪性腫瘍など）。しかしながら、患者のQOLは高いとは言えない。週3回の通院、また1回約4時間の床上安静による大きな生活制限、本来48時間かけて排泄する2日分の水・老廃物を4時間で急峻に除去することによる身体的負担、太い注射針による毎回の血管穿刺も患者にとっては強いストレスとなる。塩味を楽しむことも、お茶を楽しむこともできない。医療経済の観点では、患者一人当たりの治療費（全額補償される）はおよそ500万円程度といわれ、年間1兆7000億円を超えており、この抑制が求められている。

これらの問題の解決に向けて、我々は、東京医科大学腎臓内科菅野義彦主任教授と共同で、インプラント型人工腎臓の研究開発を行っている。患者の通院負担を低減し、また健常者の腎臓と同様に緩徐な透析を行え、さらに血管穿刺が不要となることで患者QOLを劇的に改善するものである。インプラントするには、透析液の貯蔵や駆動が大きな問題となるために、透析液を用いない血液濾過方式とし、また血液は血圧で駆動できるように設計することで、電子的な部品を不要とすることができる。図1にイメージ図を示すが、動脈より血液を装置に導入し、静脈に濾過後の血液を返す。濾液は膀胱へ誘導し、尿として排出する。図中で

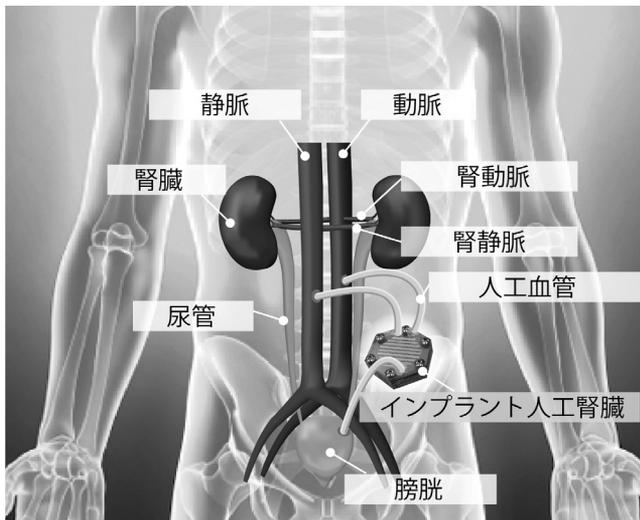


図1 インプラント人工腎臓の概念図

は簡素化のために、装置が大動脈、大静脈に接続されているが、実際には、内腸骨動脈ならびに外腸骨静脈に接続する予定である。この系は、透析システムとして考えられ得る中で最もシンプルな系といえる。尿素や尿酸、クレアチニンといった除去対象に加え、ナトリウムやカリウムなど、体内に必要なミネラルも除去されてしまうが、その分は経口により摂取する。血液濾過のみでは尿素などの老廃物を完全に除去することは困難なため、週に1回程度通院し透析治療を行うハイブリッド式を提案している。通院回数が低減できることで、医療経済への貢献も見込まれ、患者一人当たりの治療費が500万円から半分程度にまで低減できると推定している。尚、透析液を用いない血液濾過方式は、清浄な高品質透析液の調達が困難な発展途上国での適用にも適していると考えている。携帯型の人工透析装置の研究も遂行されており、米国では臨床試験も開始されているが、インプラント型にすることで、感染症の防止や、チューブ破損による事故の防止が期待される。

核となる透析デバイスは図2に示すように、血液層と濾液層を透析膜となるナノ多孔質膜で介した積層型となっている。生体適合性金属もしくは高分子材料を加工し流路を形成する。流路は、血圧で十分な血流量が導入され、かつ血液凝固の低減のために流れによどみが生じないように設計がされている。血液濾過のために透水性が必要な多孔質膜には1ナノメートルサイズの孔を有するポリエーテルスルホン膜を用い、血中の低分子電解質は濾過し、アルブミンなどのたんぱく質や血球成分は保持する。また血液濾過のためには、水分摂取も必須であり、これまでの厳しい摂水制限も大

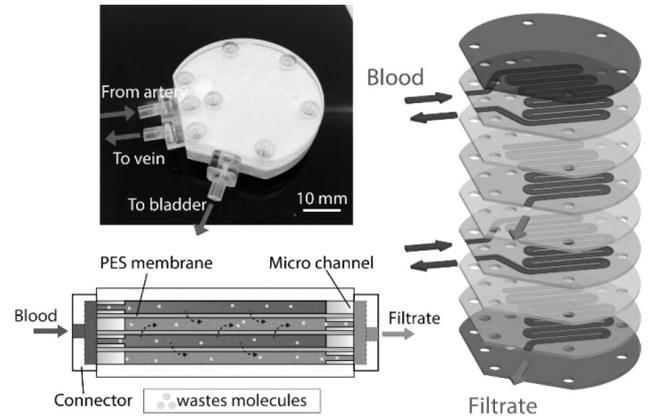


図2 インプラント人工腎臓のコアとなる積層型の血液濾過装置

幅に緩和される。

本研究は、東京医科大学腎臓内科の菅野主任教授との10年以上に渡る共同研究である。取りすぎた分は別途摂取する、濾液を尿として排出する、既存の透析治療と併用するなどのシステム設計は、ややもすれば装置の性能向上のみに注力してしまう「工」だけではない発想であり、透析患者のQOL向上という本質的な効果に向けて、「医」と「工」が連携するまさに「医工連携研究」の醍醐味である。

一方で、多くの挑戦もあった。装置の設計、製造は「工」である筆者の研究室が担当する。図2に示すような血液濾過装置を製造し、まずは生理食塩水を用いて流路抵抗や、濾過性能について評価した。次に、牛血を用いて、血液の濾過性能を評価した。28日間の実験により、実験開始後1週間で濾過性能が1/3程度まで落ちるものの、その後安定することが明らかになった。血液成分が膜表面に安定的に形成されたためと考えている。次に、ラットを用いた動物実験を行ったのだが、ここでこの実験を誰が担当するのか？という問題が生じる。この動物実験により、設計のバリデーションを行うわけだが、得られた知見を迅速に設計に反映させることが重要である。当初は共同研究者の菅野教授はじめ医師の方をお願いしていたのだが、我々理工学部の教員と異なり、診療業務がある医師の方たちは大変に多忙である。そこで、筆者の研究室の学生に、機械工学科出身ではあるが、動物実験の手技を教授していただき、またそれを研究室の中で傳承していくことで、ラットを用いた動物実験が筆者の研究室で、理工学部において遂行できるようになった。これにより設計、製造、実験、フィードバックというサイクルが迅速化し、研究が加速した。現在では、学生たちは獣医にスカウトされるまでの腕前になっている。さら

なる長期の実験のために、イヌを用いた実験を行ったが、こちらは東京医科大学の疾患モデル研究センターにて、経験豊富な獣医師のサポートの下で行った。現在、ブタを用いたより長期のインプラント実験を計画中である。

本研究のような医療技術研究は、極めて応用指向の研究であり、究極的には患者に適応されなければ意味をなさない。そのためには、事業化、装置の商品化が不可欠である。現在、事業化の計画も含め、慶應義塾大学病院や、薬事戦略の専門家等とチームを組んで研究開発を進めている。

### ウェアラブル生体モニタリングデバイス [2]

生体情報には、心拍、体温、血圧、筋電位、脳波、視線、発汗、皮膚変形など様々なものがある。医療用途として、心臓病の診断のための心拍モニタリング、高血圧のための血圧モニタリングなど、直接的なモニタリングが活用されてきた。一方で、各種生体情報とそのヒトの心理状態を反映していることが明らかになってきた。多くの生体情報を統合的に取得することで、新しいヘルスケア、情報通信応用が期待される。良質な生体情報を取得するためには、使用者に低負荷で、かつ安定的な計測が可能な生体モニタリングデバイスが不可欠である。筆者の研究室においても、脳波計測デバイスや、皮膚変形からの笑顔検出デバイスの開発を行っている。

図3に開発した脳波計測デバイスを示す。脳波計測実験を行ってみると、脳波計測において一番の問題は、髪の毛であったり、安定した頭部への電極固定であったりする。今後、脳波応用技術が発展するためには、使用者に低負荷で、かつ気軽に、すなわち短時間に簡単な操作で装着できる脳波測定システムが不可欠である。そこで、筆者の研究室では、微細加工を用い、髪の毛を避け、さらに高インピーダンスの表皮角質層を貫く微小針電極を開発した。本電極を用いることで、有毛部からも、髪の毛を避ける操作なしに脳波の計測が可能である。また、長時間の使用においては、使用者が違和感を持ち、脳波電極を動かすかもしれない。従来は、電極が皮膚に接着、固定することで長時間の安定を図っていたが、この電極では、いったん皮膚から離れても、皮膚に再度接触するとすぐに計測が可能となる。図3(b)に示すヘッドセットに電極を取り付けることで、ヘッドフォンの耳への違和感よりも、電極の違和感を小さくすることができ、また取り付け取り外しの時間が1分以下となった。2時間の映画を見て

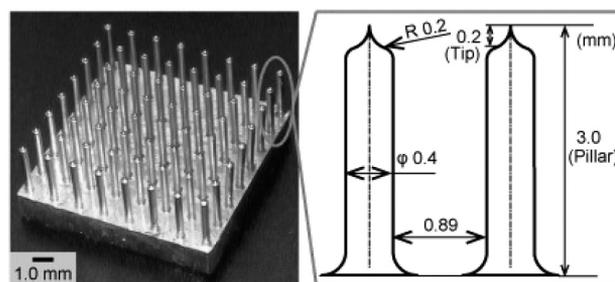


図3(a) 有毛部からも脳波計測可能な微小針電極



図3(b) 短時間設置、長時間脳波計測可能な脳波計測ヘッドセット

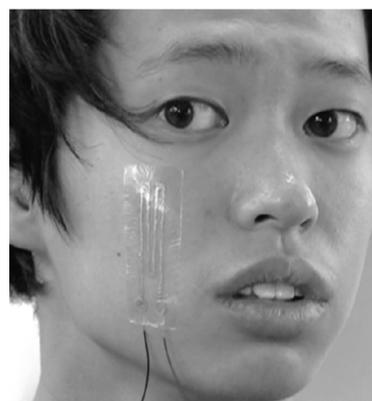


図4 肌に貼り付け可能な表情検出センサ

いる最中の脳波計測により、視聴者の心理状態と映画のシーンの相関を取る実験を行った。ホラー映画を見せられた実験参加者には申し訳ないが、怖いシーンと、特徴的な脳波との良い整合を見ることができた。

図4には皮膚に貼り付け可能な、電子タトゥー型表情検出センサを示す。皮膚に貼り付け、かつ容易にはがすことができるシール基材上に、大変形に耐える液体金属微粒子からなる配線を施した。笑顔時の皮膚変形（頬においてはおよそ3%）を抵抗変化により検

出す。本応用においても、液体金属微粒子のパターニング技術だけでなく、皮膚への貼付け技術の開発が不可欠であった。用途に特化し、センサだけでなくその固定具も含めたセンサシステムを開発することが、生体モニタリングデバイス開発に必須である。

## まとめ

本稿では、筆者の研究室で開発しているインプラント、ウェアラブルデバイスの紹介を行った。特色として、各応用分野の専門家と共同で、デバイスだけでなく、実装可能なシステムとしての開発を目指している。特に医療機器研究については、患者に届き使っていただくまで、事業化も含めて研究開発を行っていききたい。

日本が経済的成長を止めてから30年になろうとしている。先進国はこぞってGDPを増やし、平均給与も増加した。日本の平均給与はOECDの中で24位と低迷している。生産性を上げるべく、働き方改革が叫ばれているうちに、コロナウィルスのために本当の意味での働き方改革が進んだ。長時間労働であったり、非正規雇用であったりが問題視されているが、本当の問題は産業構造にある。日本が得意とするものづくり、第2次産業が中心の産業構造では、生産性が低

いのは仕方がないのである。その中で、医療機器産業は利益率が高い、生産性が高いものづくり産業の数少ない優良株である。残念ながら現在は米国に完敗中であるが、これは90年代ごろから米国ではBiomedical EngineeringやBioengineeringといった学部が大学に導入され、教育のところから支えていったためである。一方、日本ではそのような新学科はうまれず、いまだに、機械、電気、化学…といった昔ながらの学科構成をとっている。社会を支える基盤分野なのでなくすことはあり得ないのだが、しかしながら少子化も進み中、学部の定員がずっと同じ、というのは無理があるのかもしれない。大学の責務として、これからの社会に貢献する新技術の研究開発と、教育による人材育成の両輪を、常に考えていきたい。

### <参考文献>

- [1]三木則尚：マイクロ・ナノ医療デバイス実用化への課題—インプラント人工透析システムを例に—，エレクトロニクス実装学会誌，Vol. 20, pp.109-112, 2017.
- [2]Y. Yoshida, T. Kawana, E. Hoshino, Y. Minagawa, N. Miki, Capturing human perceptual and cognitive activities via event-related potentials measured with candle-like dry microneedle electrodes, Micromachines, Vol. 11 (6), 556, 2020.

## 慶應義塾大学理工学部 理工学部機械工学科 三木研究室

三木研究室では、留学生4名を含む学生23名、研究員2名、秘書1名そして三木の総勢27名体制で、何か新しく面白くて役に立つものを作る研究をしています。特に最近は、医療工学、人間工学、細胞膜工学が大きな柱となっており、医療工学では、本稿で紹介したインプラント人工腎臓に加えて、慶應義塾大学医学部や、医療機器開発ベンチャー企業との複数の共同研究が進行中です。人間工学分野では、筑波大学の情報系の研究者や、慶應義塾大学文学部心理学教室、また東京藝術大学との共同研究が進行中。細胞膜工学では神奈川県産業総合研究所(KISTEC)との共同研究を行っています。このように他分野に渡る多くの方々からの助けを借りながら、研究室に所属した学生は、学んできた機械工学を自らのバックボーンとしつつも、新しい分野の知識や技術に取り組んでいます。これには大変な努力が必要ですが、同じ道を歩んできた先輩が、後輩に親身になって指導するという良いシステムが出来上がっており、筆者はそれを暖かく見守るだけとなっています。コロナ禍で、例年にぎやかに行っている研究室行事が中止となってしまいましたが、その中でも学生同士、心の距離は近く頑張ってくれています。



2020年度の写真です。コロナ禍で全員集合とはいきませんでした…

# AIやICTを活用した 精神医学イノベーション

～ 領域横断イノベーション精神医学研究室の取り組み ～

近年の ICT や AI の技術の発展に伴い、画像・音声データの解析や、ウェアラブルデバイスの装着によって、患者の精神症状の定量評価を行うことが可能になってきている。また、ビデオカメラなどを通じた遠隔医療により、従来以上に多くの患者に質の高い医療を届けられるようになってきている。今後の精神科医療においては、テクノロジーと人がいかに融合して発展できるかが重要な課題となる。

慶應義塾大学  
医学部 精神・神経科学教室  
専任講師 岸本 泰士郎



評価者と会話中の表情、体動、音声の撮影・録音の様子

## はじめに

精神科領域における代表的な精神疾患の多くは症候群であり、診断および重症度評価に有用な客観的指標となるバイオマーカーに乏しい [1]。採血や X 線写真、コンピューター断層撮影法 (CT)、核磁気共鳴画像法 (MRI) など、精神科領域でも数々の検査が行われるが、これらは器質性疾患の除外を主な目的として行われている。純粹に精神科領域の診断やその補助を目的としたものとしては、髄液検査、脳液検査、脳血流シンチグラフィ、近赤外線分光法などが挙げられるが、精神科領域全体の中ではごく一部にとどまっているのが実状である。このような中において、現在、精神

疾患の診断においては、患者や他者からの主観的な情報に基づく病歴や症候と、本人の日常生活への支障の有無によって疾患が定義される。また、疾患の重症度評価は、評価尺度を用いて患者ないし評価者自身の主観に基づいて行われる。しかし、このような症状の評価や診断は客観性に乏しく、医療者の判断により変動する幅が大きいのが、精神科医療の大きな課題である。近年の ICT や AI の技術の発展に伴い、画像・音声データの解析や、ウェアラブルデバイスの装着によって、患者の精神症状の定量評価を行うことが可能になってきている。また、ビデオカメラなどを通じた遠隔医療の活用により、遠隔地にいても同一の医療者による治療の継続や、治験などにおける評価精度の統一・向上を図ることができるようになってきている。このように、技術の発展が精神科医療にもたらすメリットは少なくないといえる。筆者らの研究室ではこうした先進的な技術を持つ他分野と連携した領域横断的な研究に数多く取り組んでおり、本稿では、それらのうちいくつかをピックアップして紹介する。

	従来の課題	機械学習による解決
診察・検査	【定量化困難な情報のみ】 ・患者の自覚症状 ・臨床医の印象	【定量化可能な情報の活用】 ・脳画像、脳波などの検査所見 ・体動などの分析データ
評価	【主観的な評価】 ・評価者によるばらつき	【客観性の高い評価】 ・確立されたモデルによる予測
診断	【診断精度の限界】 ・再現性の低い診断	【診断精度の向上】 ・再現性の高い診断

図 1 精神科領域における機械学習の応用

## 機械学習を用いた表情・体動・音声・日常生活活動の解析

精神科領域における症状の重症度評価は患者の自覚症状や評価者の主観的判断に基づくが、時に客観性に乏しい重症度評価は、臨床での治療導入の決定や治療

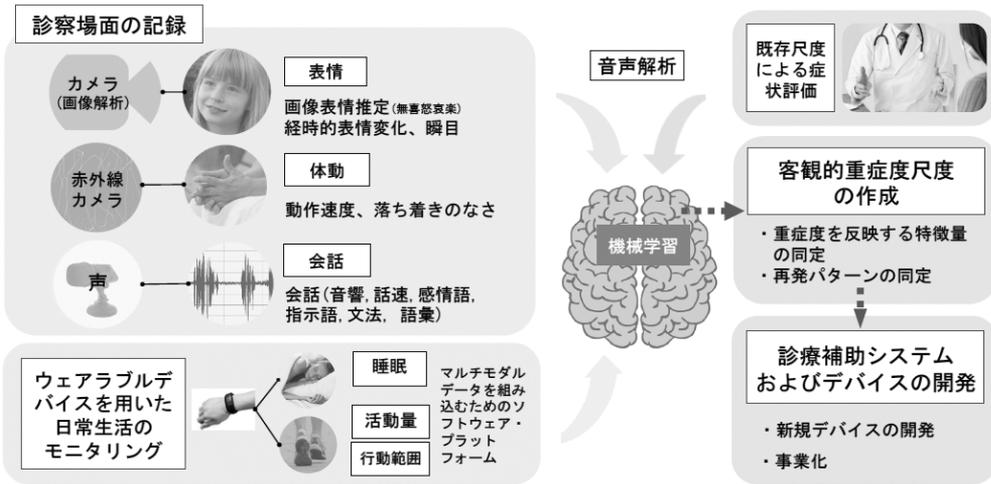


図2 PROMPTのイメージ図

効果判定や治験の大きな障壁となっている。一方で、精神医学では気分、集中力、倦怠感といった患者の主観的体験や、他者が観察可能な気分の表出、動作速度などを症状の中心と捉える。例えばうつ病の患者は、表情が暗くなり、声は弱々しく、イントネーションが平板化する。また、思考は緩慢になり、応答に時間がかかり、発言内容は悲観的になる。このように客観性に乏しい精神症状を、最新のテクノロジーを利用して定量化・可視化することができれば重症度診断が客観性をもったものになり、治療や治験の質の改善につながると考えられる。

筆者らは、この問いに対する試みとして、診察場面における表情・体動・音声の定量化や日常生活活動の定量化を通じた客観的重症度評価技術の開発を行った。Project for Objective Measures Using Computational Psychiatry Technology (PROMPT) と名付けられた本

プロジェクトは、日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業：ICTを活用した診療支援技術研究開発プロジェクト」として採択された。本研究は、慶應義塾大学を中心とする医療機関に加え、FRONTEO、日本マイクロソフト、オムロン、ソフトバンクなど国内7つの会社が参画した産学連携プロジェクトである。具体的には、診察場面における患者の音声、体動、表情を記録

し、うつ病の重症度評価を行う複数の尺度によってラベリングすることで、AIに重症度の評価をさせたり、治療によって改善が得られているかどうかの判定を行わせたりする技術を開発し、うつ病および神経認知障害の重症度を評価するための客観的で非侵襲的で使いやすいバイオマーカーを開発することを目的とした[2]。筆者らはこれらの研究成果を生かし、音響学的な特徴を用いて認知症のスクリーニングを行う技術、ウェアラブルデバイスからうつ病の重症度評価を行う技術、話し言葉から認知症のスクリーニングを行う技術等を開発、それぞれ特許出願するなど、社会実装に向けた準備を行なっている。

これらの研究成果が臨床現場での意思決定の指針となり、臨床試験が失敗するリスクを低減できるようになることを目指している。

### 自然言語処理を用いた精神疾患の理解

うつ病、双極性障害、統合失調症、認知症などの精神疾患の診断や治療は「言葉」を通じて行われている。正しい診断や治療のためには患者の言葉を丁寧に理解し症状の特徴を取り出す必要がある。例えば、双極性障害においては、観念奔逸と呼ばれる、思考が本筋から逸脱したり飛躍したりしてまとまらない状態が認められることがある。また、認知症においては、単語が思い出しづらくなるような語想起障害と呼ばれる状態が認められることがある。しかし、こうした特徴は客観的に評価したり数値化したりすることが困難であった。

そのため、筆者らは、自然言語処理、すなわち人間が話す自然言葉をコンピュータに処理させる技術を利用



図3 神経心理検査中の前頭葉脳波を測定する様子

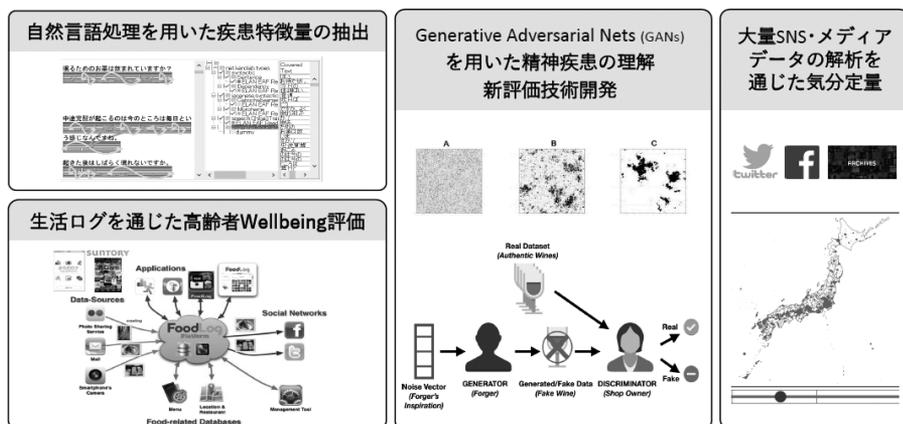


図4 UNDERPINのイメージ図

発病前、あるいは早い段階で特定することができれば、精神疾患の早期発見・早期介入が可能となると考えられるため、本研究で得られた知見をもとに、診断や治療のために有用な新しいツールを開発していきたいと考えている。

### IoT 技術を用いた健康経営オフィスの実現するシステムの開発

我が国においては、労働者のメンタルヘルス問題が深刻となっており、「働き方改革」の必要性が叫ばれて久しい。2015年にストレスチェック精度が導入されるなど、これまでも様々な取り組みが行われているが、改善の兆しがみえていない状況にある。こうしたストレスの評価が難しい理由として、ストレスの性質の問題がある。慢性的なストレスがうつ病のリスク因子であることに疑いはないが、一方で、適度なストレスや困難の克服はやりがいにもつながるため、ストレスの良し悪しを単純に評価することは本人であっても難しい。さらに、ストレスチェックは年に一度しかなく、主観による評価のみで客観性に乏しいという問題があるため、会社にとって従業員のストレスマネジメントが課題とされていながら、それらを客観的に定量・可視化する方法が限られているのが現状である。

こうした問題意識のもと、筆者らは、職場での業

用して、患者の言葉を数値化することで疾患への理解を深め、予防や早期発見などの技術開発につなげることを目指す研究を行なっている。Understanding Psychiatric Illness through Natural Language Processing (UNDERPIN) と名付けられた本プロジェクトは、科学技術振興機構 CREST「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」の研究として採択されている。具体的には、複数の医療機関や、静岡大学、国立情報学研究所、東京大学などの研究機関と協力し、精神疾患をもつ患者がSNSに入力したテキストを収集し、自然言語処理を用いた自動分析と機械学習によって疾患に紐づけされたデータの解析を通して、同定される疾患の特徴量を抽出することを計画しており、現在患者のリクルートなどを行なっている。自然言語処理を活用し、言語的な特徴を

### 現場の負担を抑えたセンシングでストレスや幸福度を定量し健康経営オフィスを実現するシステムの開発

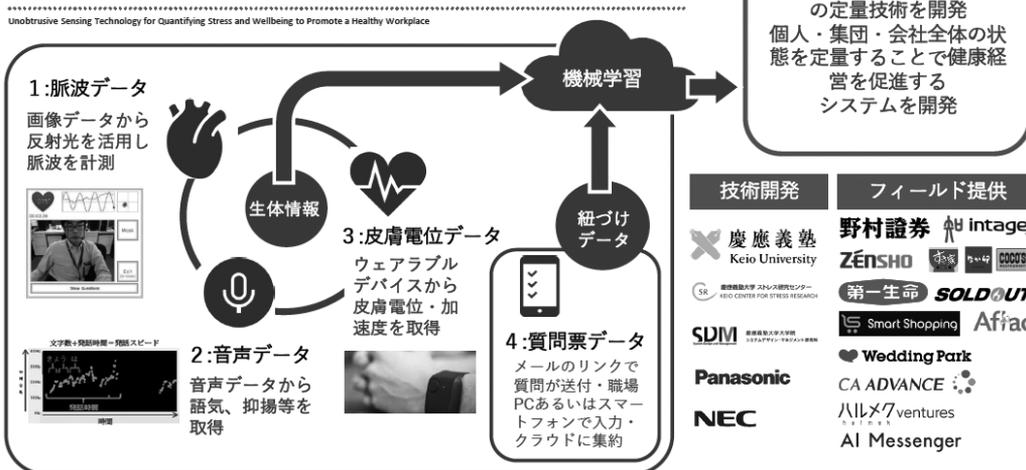


図5 IoT 健康経営関係のイメージ図

務に負担をかけずに、労働者のストレス度や幸福度（well-being）の程度を客観的に定量する技術を開発し、企業の健康経営を促進するシステムの創出を目指している。

本研究は、AMEDの「IoT等活用行動変容研究事業：現場の負担を抑えたセンシングでストレスや幸福度を定量し健康経営オフィスを実現するシステムの開発」として採択され、パナソニック(株)、日本電気(株)との共同研究としてスタートし、現在までに多くの企業の協力を得て研究を行っている。具体的には、脈拍データ（画像データから反射光を取得、脈拍を非接触で記録し、心拍変動を解析して得られる自律神経活動を計測）、音声データ（職場の音声のデータを解析し、語気、抑揚等の感情推定技術を利用し、緊張状態を計測）、皮膚電位データ（ウェアラブルデバイスから取得した皮膚電位等のデータをストレスデータに変換）を収集し、同時に取得した質問票データと照合することで、従業員のストレスやwell-beingを評価することを目的としている。得られたデータを慶應義塾大学とパナソニック(株)、日本電気(株)が協力して解析を行ったところ、高ストレス状態と低ストレス状態、高well-being状態と低well-being状態の被験者間で、複数の生物学的指標において有意差が認められたところであり、さらなる解析を継続して、詳細の分析を行なっていく予定である。こうした指標を職場や本人にFeedbackすることで、労働環境の改善がしやすくなる、セルフマネジメントがしやすくなる、といった

効果が期待される。このように、個人、集団、会社全体の状態を定量することで、うつ病等の精神疾患によるご本人や社会への大きな損失に歯止めをかけ、健康経営の実現・普及に貢献したいと考えている。

## おわりに

筆者らの研究室で行なっている研究について紹介した。種々の先端技術を用いて得られた所見を整理、理解して治療につなげていくことで、より多くの患者に対し質の高い医療を提供できるようになる可能性があり、技術の発展が精神科医療にもたらすメリットは少なくないと思われる。医工連携をはじめとした他分野との連携の中で、精神医学におけるイノベーションを実現できるよう、これからも邁進していきたい。

### <参考文献>

- [1]Kapur S, Phillips AG, Insel TR. Why has it taken so long for biological psychiatry to develop clinical tests and what to do about it? *Mol Psychiatry*. 2012 Dec;17(12):1174-9.
- [2]Kishimoto T, Takamiya A, Liang KC, Funaki K, Fujita T, Kitazawa M, Yoshimura M, Tazawa Y, Horigome T, Eguchi Y, Kikuchi T, Tomita M, Bun S, Murakami J, Sumali B, Warnita T, Kishi A, Yotsui M, Toyoshiba H, Mitsukura Y, Shinoda K, Sakakibara Y, Mimura M; PROMPT collaborators. The project for objective measures using computational psychiatry technology (PROMPT): Rationale, design, and methodology. *Contemp Clin Trials Commun*. 2020 Aug 18;19:100649.

## 慶應義塾大学医学部 領域横断イノベーション精神医学研究室

慶應義塾大学医学部 領域横断イノベーション精神医学研究室（Integrated Innovation Lab for Psychiatry：i2Lab）は先進的な技術を持つ他分野と精神医学との融合によりイノベーションを生み出し、これまで精神医学単独では解決できなかった重要課題の解決を目指す研究室である。機械学習を用いたRBG・赤外線・音声・ウェアラブルデバイスデータの解析、自然言語処理を用いた精神疾患の特徴量の同定、遠隔通信技術を用いた検査や治療の展開、腸内細菌と脳との相関、ウェアラブル脳波計を用いた病状評価など、数多くのプロジェクトを手掛けている。共同研究先は他の診療科、工学部、最先端の技術をもつ企業など多岐にわたる。また、本研究室では、人文・社会科学の研究者らとともに、ELSI（倫理的、法的、社会的課題）に関する検討も行なっている。具体的には、先進的な技術を持つ他分野と精神医学の融合に伴う、個人情報保護や知的財産権等の法政策上の課題をはじめ、産学官共同研究のあり方や、人権的な問題・経済的な問題等について研究を行っている。



領域横断イノベーション精神医学研究室  
岸本 泰士郎

## 編集後記

■当発刊月は、東京六大学野球リーグ戦開催中。月末の早慶戦は毎年気になる。コロナ禍の制限下でも、歴史ある屋外スポーツには春季熱気が漂う。野球試合にも関わらず、各応援団合戦も多彩だ。昨年のNHK連ドラの「エール」で古関裕而氏に作曲を依頼した早稲田大学応援歌「紺碧の空」をはじめ、各校応援歌が多数あり、それぞれの逸話が存在する。2015年には、「ハンカチ以来ぱっとせず、ビリギャルがお似合い」と早慶応援団が盛り上げたプロモーションバトルなど、場外乱闘も熱い。優勝戦日には、教授も休講にするなどの計らいの良き時代もあり、早慶戦だけは無欠席という伝説のツワモノもいた。最近では、OBがござって内野席を陣取り、△▼年前と同様or以上の歓声と奇声の往年キワモノも目立つようになった。

慶應の独立自尊、早稲田の質実剛健と近代日本建国の青天を勢い衝く如く、それぞれ自我作古、在野精神と誰にでも機会均等に有する学ぶ進取の姿勢を最高学府で説いた。慶應は人の上にも下にも人を造らずと、早稲田は門の無い大学、学の独立として、学びと知を得る平等を具現化し、続けてきた。

さて、本号は慶應義塾大学理工学部が展開している産学官や医学部との医工連携・展開を特集した。福澤諭吉が説くサイエンスという実学を果敢に採り入れ、エンジニアリングの規模や動作の拡張性追及ではなく、最大多数の最大幸福としてその実学の社会実装の潜在可能性を現在進行形で垣間見ることができた。縦割り細分化が進行する現代社会に、総合大学ならではの俯瞰した学際ミライアプローチに敬服し、期待したい。銀座のクラブを経営する早稲田OGは、客同士が慶應大同窓故の自主的な名刺交換などの横連携ソーシャル意識(義塾関係者の社中協力)が羨ましいと言う。(独立独歩か、孤立無援か、自画自賛の方の“杉のお山”)

■コロナ禍で思うように行動出来ない中、娘たちと近場で楽しむ時間が増えてきました。本来ならば、出かけたら夜遅くまで帰ってこないであろうお年頃ですが、残念ながら今はそうもいかない状況です。

昨年、湘南の地に移住した我が家。家から3分歩けばここは海!という事で、天気の良い週末に誰かが家に居ればとにかく外へGO!!左手に「江ノ電」、右手に「キラキラと輝く青い海」の景色に癒され、心地よい潮風にあたりながらのウォーキングは格別です!以前は海外からの観光客でごった返していた鎌倉高校前のアニメの聖地を横切り、七里ガ浜エリアの「珊瑚礁」、「アマルフィ」、「bills(ビルズ)」などの人気店は「デートで来てね!」と横目で見ながら、ゆるゆると歩いて稲村ヶ崎まで。稲村ヶ崎公園周辺は週末でも比較的空いているので、大抵この当たりで小休止と言う名の奢らされタイムとなります(笑)。海を眺めながら足湯をし、ソフトクリームも頂ける稲村ヶ崎温泉はお気に入りスポットのひとつ。稲村ヶ崎公園の上から見渡す七里ガ浜の海、富士山、そして江ノ島の絶景はお勧めです!

夕方になれば美しい夕焼けタイム。眩いばかりの光が海と空を照らしながら沈む様子は何度観ても感動し、生きて良かったと思えます。帰り道は夕焼けに向かって歩いてもよし、江ノ電に乗りながら夕焼けを眺めてもよし。江ノ電で藤沢に向かう時は進行方向左側の席必須です!

そしてもう一つ、娘たちと始めた事が「釣り」。数年前から始めた私を見て「やりたい!」というので、私が先生となり、釣りガールを引き連れて海辺に出没するようになりました(笑)。そんな娘たちもいずれ(きっと)独立する日がくるので、今を大切に過ごしたいと思っているのは「母」だけかも??(みんな)

2021 5  
No.340

# 電波技術協会報

フォルン  
Future  
Of  
Radio  
Network  
FORN

No.340 / 2021年5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 農住ビルアース 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  
築地事業所  
〒104-0045 中央区築地 1-12-13 ポアソンプルービル 6F  
TEL 03-6260-6505 FAX 03-6260-6525

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

本誌に対するご意見・ご感想をお寄せ下さい。

郵送: 〒215-0004  
川崎市麻生区万福寺 1-2-3 農住ビルアース 9F  
一般財団法人電波技術協会 FORN 編集担当  
FAX: 044-965-1222

reea  
Radio Engineering &  
Electronics Association