

(5) 研究テーマ：GPS 構築のための

センサリッチ柔軟エンドエフェクタシステム開発と実用化

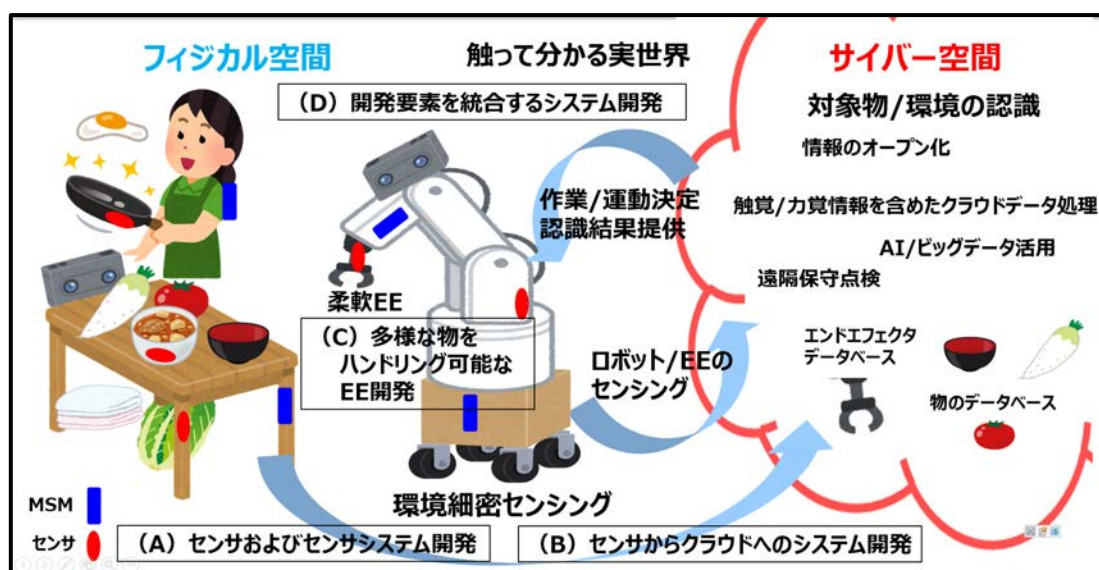
代表事業者：立命館大学 山形大学 人機一体 チトセロボティクス

1) 研究内容

概要

現状のロボットは、自由空間でロボット自身の形状を運動制御する能力は極めて高い。しかし、対象物やロボット周辺環境と機械的な接触を伴う作業の実現は、一般に困難である。このために、人手に依存する作業も多く残されており、労働力不足が我が国の大きな課題となっている。たとえば、食品産業では、取り扱う対象物は、形状、柔軟性、脆弱性、水分付着/含有など様々な特徴を有しているため、ロボットなどによるハンドリングが非常に難しい作業となっている。

このような問題に対して、本プロジェクトでは、接触作業を容易とするために、センサを有する柔軟な高機能エンドエフェクタを開発する。また、ロボットとエンドエフェクタの状態のセンシングのみでは、環境の認識が十分にできないため、簡単に環境のセンシングが可能な各種センサ開発とその計測データをサイバースペースで利用可能とできる IoT システムの開発を行う。



図表 2-(5)-1 研究概要

これらの技術開発によって、環境や対象物をセンシングして、GPSにより複雑な作業を自動化システムによって達成する。GPSを構築するセンサリッチで柔軟なエンドエフェクタシステムをここではSSES (Sensor Rich Soft End-Effector System)と呼び、サイバースペースとフィジカル空間のギャップを解消するプラットフォームとする。

研究項目

本研究内容は図表 2-(5)-1 に示される (A)～(D) の 4 つの部門から構成される。

(A) センサ/センサシステム開発

センサ自身の開発は本プロジェクトでは実施しない。ここでは、ニーズ分析から課題解決のために既存センサの新システム化技術を開発する。具体的には、圧電センサの高感度接触認識と他自由度計測実現、耐久性有するポリウレタンカセンサ開発、フローセンサと圧力センサ複合利用による空気圧駆動ハンドの位置推定/接触力推定などである。

(B) センサからクラウドへのシステム化技術開発

サブグループ II と協力して、MSM（マルチセンサモジュール「竹」レベルに相当）を設計製作する。各種センサなどを統合可能な PDH（フィジカルデータハブ）を設計製作して、センサ、MSM、PDH を介して、クラウドに繋がる IoT システム（サブグループ I 「My-IoT」と連携）を完成させる。

(C) EE 用機構/駆動システム開発

対象物を確実に把持するために、柔軟材料表面の摩擦を安定化させる材料や構造を開発する。また、把持の安定化のために異方性剛性機構を開発する。異方性剛性構造が実現できれば、把持方向には柔軟で把持方向以外（持ち上げ方向など）には剛性が高い性質を実現でき、把持の安定化を達成可能となる。空気圧駆動、電動モータ駆動の EE を、各種の作業目的に合わせて設計製作する。ロボットアームに開発した EE を搭載して、EE の基本的な性能を実験室内で確認する。

(D) システム化技術開発

作業課題を達成するために必要なシステム開発を実施する。対象物の認識では、食品のハンドリングのために必要なデータベース構築のための計測とモデリングを行う。特に、画像データからの認識に深層学習が有用であるので、現場作業を想定した大量のデータから効率的な学習結果を得る方法を提案する。現場での実証実験を数多く実施して、開発してきたハード/ソフトの実用上の問題点を明確にしつつ事業化への道筋をつける。

推進方法

本プロジェクトでは、社会実装を重視した活動を行ってきた。事業化を促進するために SIP-SSES 事業化推進事務局を設置した。この事務局を中心に労働力不足が顕在化している分野の企業や新しい自動化技術を求めている企業などを中

心にヒアリングを行い、課題を科学的に分析した。この分析から構造、特にプロジェクト前半では、センサ、アクチュエータ、IoTなどの技術課題を明確化して、大学の各研究室に課題を提供した。

ニーズからの問題作成後、解決技術チーム（ユニット）を形成して、特にプロジェクト後半では、システム化から事業化への流れで実施した。また、研究開発の途中の段階でも常時ユーザ側からの課題のフィードバックを受ける体制とした。このようにニーズ駆動により研究開発を実施したので、完成したシステムは、事業化の可能性が極めて高い内容になると期待される。

2) 技術的目標

説明を明確にするために、本プロジェクトの特徴を考慮して以下のように到達レベルを定義する。

Level 1 ニーズ分析から問題作成

Level 2 - 解決法構想から利用要素選択 協力チーム編成（ユニット形成）

Level 3 - キーテクノロジー実証のデモンストレーション

Level 4 - ラボレベルでのキーテクノロジー周辺システム実証実験

Level 5 - ラボレベル（実証実験フィールド）で GPS としての SSES 実証実験

Level 6 - 現場での実証実験

Level 7 - 実運用

Level 8 - 実運用の規模拡大

(A) センサ/センサシステム開発

センサシステム開発として、特許申請、論文発表、学会発表などを実施する。
Level 5 を達成し、幾つかは Level 7 から 8 とする。

(B) センサからクラウドへのシステム化技術開発

MSM を約 300 セットと PDH を約 80 セット製作し、北海道から沖縄での実証実験を実施する。これにより 20 程度で Level 6 を達成する。その中の 2、3 では、実際の事業の中での利用を開始し、Level 7 から 8 を目標とする。

(C) EE 用機構/駆動システム開発

多様なエンドエフェクタを 20 種類程度開発する。これらのエンドエフェクタについて Level 5 を達成する。その中の 2、3 例では Level 6 とする。

(D) システム化技術開発

食洗作業、食品ハンドリング、配膳下膳作業について、特定のエンドエフェクタを利用して、システム化を完了し Level 6 を達成しレベル7を目標とする。チトセロボティクでは、食洗器関連では Level 6 を達成し、Level 7 を目標とする。人機一体は Level 6 を実現する。

3) 課題目標の達成度

① 国際競争力

センサからクラウドへのシステム化技術開発として、MSM と PDH を設計開発して実証実験から事業化を達成している。類似の目的のデバイスやシステムは数多く存在する。しかし、本プロジェクトの成果物は以下の設計方針によって実現されているので、他の既存物に対する優位性がある。

設計方針

1. 最小実現

オーバースペックとならない（汎用部品 通信 メモリ エネルギー）

2. 利用容易

ユーザとサプライヤに利用容易 汎用性の高いツール設定 OSS

3. CPS 統合

データに時間 空間 単位の情報を付与

4. P 作用拡大

Physical 空間への作用 短サンプリングによるアクチュエーション

まず、MSM のベンチマークを実施した。ベンチマークに際しては、IoT を事業の一部としている三宅制御技術、スリーアップテクノロジー、iRooBo からの評価を受けた。優位性として、

・センサ種類が多い ・拡張性が高い ・利用が容易 ・低価格
が挙げられている。

次に、MSM、PDH、アクチュエータやロボットの全体のシステムについて、富士通のベンチマーク結果では、当初計画にあるように個人事業主や中小企業への導入障壁が少ない優位性が示されている。また、ロボットなどとのアクチュエータ部との連携を可能とする点も評価されている。これらの取り組みは、OSS 化の活動として、LF-Edge での Akraino Rel. 6 (2022/6 月) で Blueprint のリリースを完了している。(Robot basic architecture based on SSES Blueprint Rel. 6) その結果、このコミュニティで注目を集め、2021 年から 2022 年にかけてのアワードを受賞している。Akraino Annual Awards 2021-2022 Blueprint of the year “CPS Robot Blueprint”

次に、エンドエフェクタを含むシステムについて、ベンチマークを実施した。空気圧駆動のソフトグリッパが世界的にもブームとなり、ベンチャー企業も出現している。その中でも、アクチュエータの材料（食品適合承認）、人工知能による対象物認識、ソフトグリッパの販売を開始などで、世界トップ企業である米国のS社を対象とした。

S社は販売を開始しているので、購入してその性能を評価した。我々の協力支援企業の事業である冷凍牡蠣フライの高速ハンドリング実験を行った。我々が開発した3Dプリンタ製のソフトエンドエフェクタでは1分間に80個の高速ハンドリングを達成している。しかし、S社製のグリッパでは、高速ハンドリングは実現できないことが判明した。この理由は、S社製ソフトグリッパは、剛性が高く、食品などの柔軟な対象物に馴染む形状が作れずに、接触面積が極めて小さいために把持の安定性が確保できないこと、爪先の形状が自由に設計できないため対象物の特性に合わせた設計ができないことが挙げられる。

②研究成果で期待される波及効果

本研究成果は、食産業、農林水産業、中小製造業、服飾産業、ワイヤーハーネスなど柔軟工業部品製造など労働生産性の低い産業分野へ幅広く利用される可能性が高く、波及効果は大きい。

また、学术界への貢献もある。同時期に実施した文部科学省科学研究費新学術研究領域「ソフトロボット学」との合同シンポジウムなどを通じて、社会実装を重視する本プロジェクトと科学的探求を重視するソフトロボット学プロジェクトの間で有益な情報交換を実施することができた。今後も本プロジェクトの成果は、学术界へ有効に活用されると期待できる。

③達成度（1）

概要

センサシステム開発では、予定どおり完了して、MSM、PDHと組み合わせてCPSとして現場での実利用が開始される段階に達している。MSMとPDHは現場での試行実験から課題を克服して、4カ所以上の実証実験でデータ解析から各事業者にも有用な結果を獲得し、20カ所以上の現場での実証実験からヒアリング完了している。設計や利用の情報はすべてオープン化している。EE用機構/駆動システム開発では、20程度の種類を開発して特許14件出願済みである。システム化技術開発では、データベース構築のための計測とモデリング、画像処理/クラウドデータ処理/AI技術（特許1）などの有用技術を開発し、人機一体、チトセロボティクス、立命館大学、九州大学、大阪工業大学において10件程度のシステムを完成させた。

学術として、2020年～2022年の間に、国際誌 32（最大 IF: 19.069、最小 IF: 0.331、平均 IF: 約 3.95）国際会議 31 などの成果を上げた。また、前述のように、科学研究費グループと連携して、「ソフトロボット学入門—基本構成と柔軟物体の数理—」2023年1月出版 株式会社オーム社と完成させ、「産業用ハンドリングシステム」ハンドブック（2023年4月（予定）株式会社コロナ社 [監修] 川村貞夫 平井慎一）を SIP 関係者中心に執筆中である。さらに、英文出版として CRC Press (Taylor & Francis Group) Title: “Food Manipulation Technology: A Soft Robotics Approach” Authors: Zhongkui Wang, Shinichi Hirai がある。

各項目達成度

(A) センサ/センサシステム開発

・圧電センサ

圧電フィルムセンサ（村田製作所製）をエンドエフェクタの作業に適するように改良し、多自由度が計測可能とできる構成を開発した。得られた成果は、イノベーションジャパン 2022 で展示し、特許 1/国際特許 1 出願済みである。今後様々な接触を伴う作業での利用を検討している。Level 5 を達成して、クラウドでのデータ解析から異常診断のアルゴリズムも提案して報告している。

・ポリウレタンセンサ

耐久性を有するポリウレタン材料の光弾性特性を利用したセンサを開発した。法線力に加えてハンドリングで重要となる接線力の計測を可能とする方法を開発した。また、移動ロボットの台車部に分布的にポリウレタンセンサを配置して、荷物の重心位置推定、液体の振動などの計測が可能であることを確認した。本センサ利用については、Level 5 を達成している。成果の発表として、IF が 4 程度の国際誌に 2 度掲載した。今後の現場での利用が予想されている。

・フローセンサ/圧力センサ複合センシング

空気圧駆動エンドエフェクタにフローセンサ/圧力センサを利用することにより、エンドエフェクタの接触を推定、空気漏れなどの異常検出が可能であることを確認した。これらは、北海道ホクレン（キュウリ）、サンビット（牡蠣フライ）などの現場での実証実験であり、Level 6 となっている。

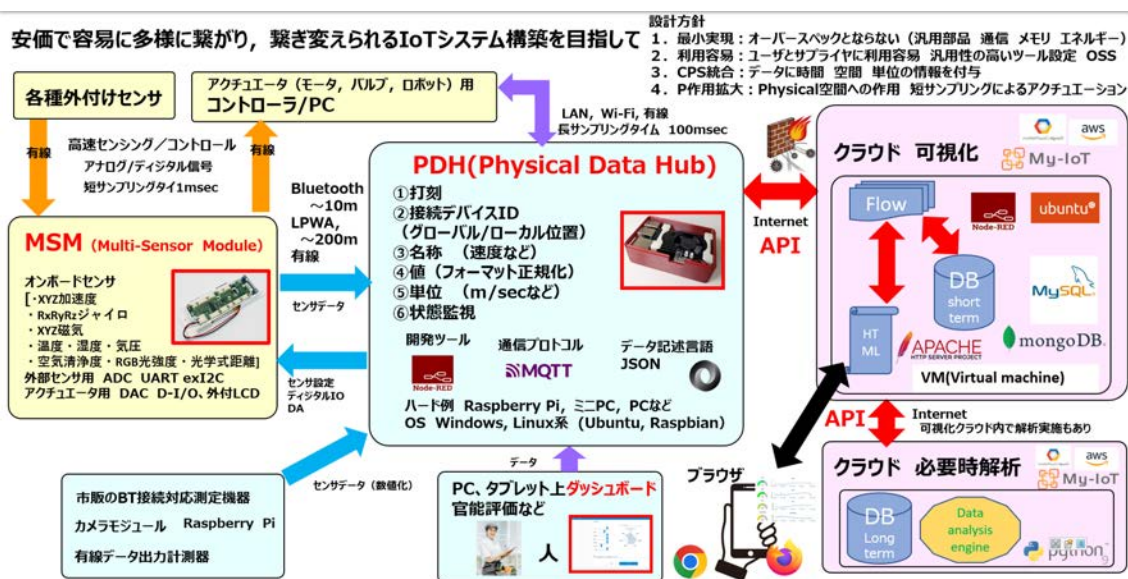
次に、フローセンサと圧力センサを利用して、エネルギー方程式から体積変化を実時間で推定するアルゴリズムを提案した。この方法によれば、位置センサを付加せずにシリンダの位置を 1mm 程度精度で推定できることを実験的に確認している。この成果は Level 5 で達成している。

フローセンサを利用して、発酵過程の詳なセンシングからクラウドでの解析が可能となることを示した。後述の R-CPS とフローセンサ/圧力センサを組み合わせることにより、二酸化炭素のセンシングから発酵課程の推定を実現しつつある。この成果は、株式会社 Mountain Gorilla との連携で Level 7 を達成している。さらに、同社の有するオンラインシステムに本開発内容を組み込んだ事業展開を予定しているため、Level 8 に到達すると予想される。

(B) センサからクラウドへのシステム化技術開発

前述の設計方針にしたがって MSM と PDH を設計し、図表 2-(5)-2 に見られるように全体を R-CPS (Reconstructable basic system for Cyber Physical System) としてまとめた。試作品を製作後に、いくつかの試行実験を研究室と利用現場で実施し、問題点を明確にして解消した。2021 年から 2022 年にかけて半導体不足状況ではあったが、MSM を約 300 セットと PDH を約 80 セット製作して確保した。

本システムの大きな目標は、安価に容易に実現することである。データの可視化のみであれば、個人でも利用可能な価格 (6 万円程度) で実現できる状況を達成した。

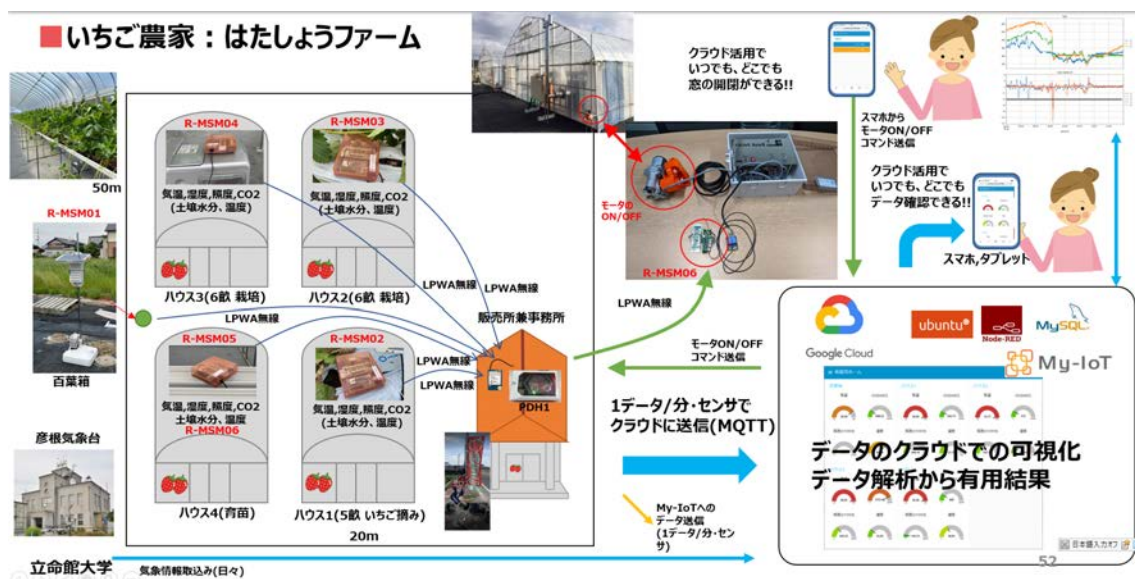


図表 2-(5)-2 R-CPS

利用ソフトやマニュアルなどは、本プロジェクトの HP で 2021 年度から公開中であり、実証実験現場の人間が自由に利用可能となっている。

実証実験の一例を、図表 2-(5)-3 に示す。個人経営のイチゴ農家で、温度管理を人の作業として窓の開閉によって実施してきた。正確な温度などの環境データもなかったが、本システムを導入して、データの可視化や解析から気象庁データとの差異や各温室の個別条件なども明らかになり、スマートフォンによる遠

隔管理と窓の遠隔操作によって、イチゴ農家の負担が大きく低減できた。



図表 2-(5)-3 イチゴ農家実証実験例詳細

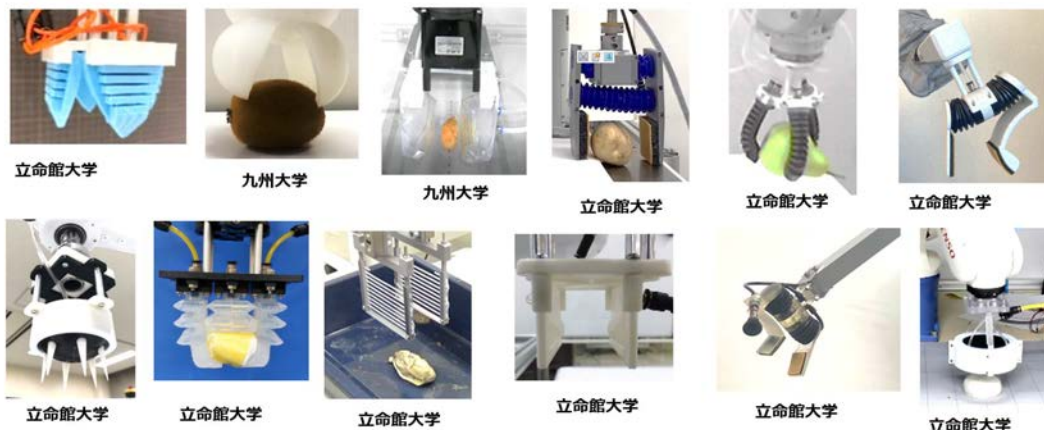
北海道、山形、大阪、福岡、沖縄などでの実証実験を実施した。他の実証実験例は、以下の達成度(2)で記載するが、全体として30程度でLevel 6を達成しつつある。その中の4件(はたしょうファーム、ワボウ電子、比延ゆば、Mountain Gorilla)は、現状(2022年11月末)でLevel 7に到達した。この中から、2社(ワボウ電子、Mountain Gorilla)は、Level 8に向けて活動している。

(C) EE 用機構/駆動システム開発

本プロジェクトの課題解決のためには、柔軟エンドエフェクタが重要な役割となる。従来技術では対象物や環境(机など)に接触することは極力避けて衝突などの問題を回避してきた。しかし、柔軟性によって接触を容易に実現することによって、従来困難とされてきた作業を容易に実現でき、フィジカル空間での力学情報を、入手可能となるため、今後のGPS構築に有用な手段となる。

本プロジェクトで新規に開発したエンドエフェクタを図表 2-(5)-4、5に示す。すべて実用目的から開発されたエンドエフェクタであり、システム構築すれば、実際の利用が可能となる。

■ 空気圧駆動



3Dプリンタによる新しい製造法，柔軟化と剛体化の設計や調整，
柔軟センシング，接触部から離れたセンシングなどが重要

①②③④⑤⑥

13

図表 2-(5)-4 空気圧駆動柔軟エンドエフェクタ開発例

■ 電動モータ駆動



アクチュエータ数，柔軟性，摩擦安定化，異方性剛性，剛性可変性，センサ有無，
軽量性，柔軟センシング機能などが重要
既存EEを含めて各EE機能とハンドリング可能対象物のマッチングアプリ開発中

①②③④⑤⑥

日本輸入力大7 14

図表 2-(5)-5 モータ駆動柔軟エンドエフェクタ開発例

これらのエンドエフェクタはすべて Level 5 を達成している。その中で図表 2-(5)-25 に示される 8 件は Level 6 に到達している。

エンドエフェクタ開発有用技術

・ 異方性剛性要素

対象物をエンドエフェクタで把持する場合、エンドエフェクタの接触部が対象物の形状にならって変形すれば、把持の確実性を高めることが可能である。

モータ駆動の指関節数を増加させてしまうとエンドエフェクタの重量、体積、価格を増加させ、実利用や事業化から遠ざかる。そこで、本プロジェクトでは、異方性弾性特性を有する接触部構造を開発した。3D プリンタを利用して製作するメッシュ構造によって、異方性剛性が実現可能であることを山形大学グループが提案した。

山形大学で開発された異方性剛性要素は、人機一体の開発するエンドエフェクタの指先に装着され、JR 西日本での実証実験により、その有用性を実証した。この実証実験では、最大で 200kg 程度の架線部材の交換を実施するため、把持物の落下は完全に避けなければならない作業となる。人機一体の操縦者に力情報を伝達する機能に異方性剛性の機能が加わり、作業の確実性を大きく高めることが可能となった。

・摩擦安定化要素

食産業における食器の洗浄は、労働力不足が顕在化している作業のひとつである。食器の形状、重量などは多様であるので、エンドエフェクタには多様な食器に対応して把持可能な機能が必要となる。また、食器の回収から食洗機への投入と取り出しでは、食器には種々の残飯、水などが付着した状態であり、把持方法に大きく影響する。水、脂、残飯などの付着した食器は吸着パッド方式で把持することはできない。グリッパ形式では、表面の付着物により摩擦特性が大きく変化して、把持の安定化を損なう場合が多い。そこで、本プロジェクトでは、摩擦を安定化させる高分子材料と、表面形状を導入する。

摩擦安定化高分子材料として、ハイパーV を選定する。表面形状では、実験的に、種々の溝形状を試験して、適切な形状を決定した。さらに、表面のハイパーV 材料と別の柔軟材料で構成される構造が摩擦安定化には効果的であることを示した。水、脂、洗剤など表面に付着させた場合でも、摩擦係数を 0.3 以上とすることが可能となった。その結果、作業の確実性を保証するのみならず、エンドエフェクタの把握力を小さく設定でき、全体の重量、体積、価格を低く押さえることに貢献している。

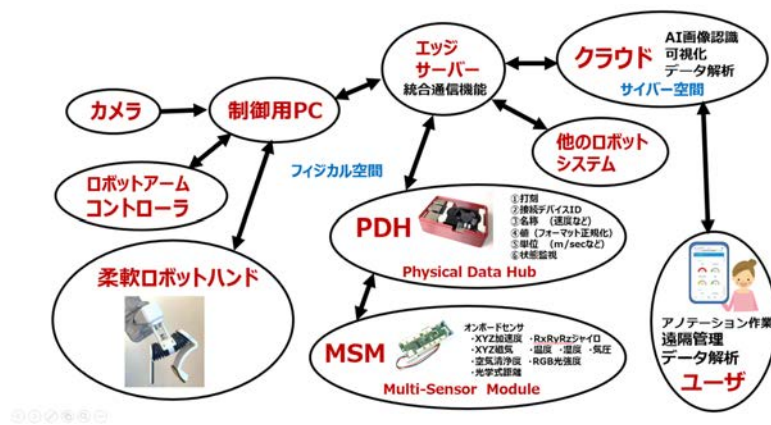
・3D プリンタ利用エンドエフェクタ設計法

空気圧駆動エンドエフェクタでは、対象物の特徴に依存して、形状などから設計し直すことが有用となる場合が多い。このような目的では、近年急速に技術開発が進む 3D プリンタの利用が効果的となる。本プロジェクトでは、液体シリコン（食品適合材料）によって、多様な形状のエンドエフェクタを設計/製作し、要求される作業に導入してきた。たとえば、冷凍牡蠣フライの高速ハンドリング用エンドエフェクタ開発を、立命館大学（設計）山一ハガネ（製

作) 近藤制作所 (組み立て/耐久試験) サンビット (システム/試験) クニヒロ (ユーザ仕様) の連携チームで実施している。

(D) システム化技術開発

本プロジェクトで開発したセンサシステム、MSM、PDH、柔軟エンドエフェクタ、その他のシステム化技術を、統合したシステム例は図表 2-(5)-6 として表現できる。以下に示すシステム統合例は図表 2-(5)-6 に示す方法を利用している。ただし、システム構成方法としては、PDH から直接クラウドへ接続する場合など、利用環境に応じて柔軟に修正可能である。



図表 2-(5)-6 システム統合例

システム統合された例を以下に示す。ただし、これ以外にもシステム化された例もあるが割愛する。

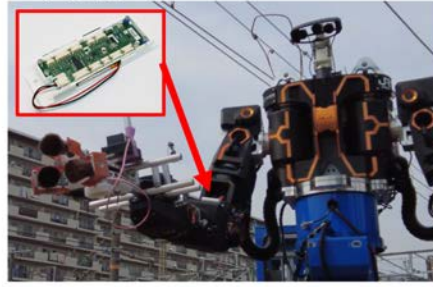
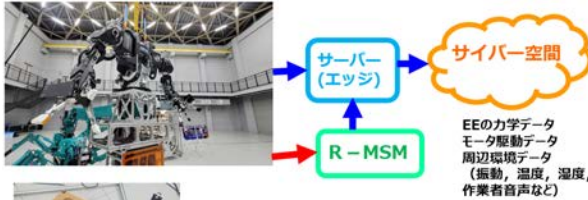
・遠隔操作による重量物の高機能ハンドリングシステム

人機一体の制御技術により、人の操縦によって高機能に重量物もハンドリング可能なシステムを実現した。GPS は有用な手法ではあるが、センサ信号のために、高速なサーボループやロボット全体の制御系に影響を与えることは避ける必要がある。本プロジェクトで開発した R-CPS (MSM、PDH) は外付け (後付け) でセンサ信号をクラウド上で利用可能であり、この問題を解消できる。

JR 西日本の実験線でこの全体システムの実証実験を実施した。図表 2-(5)-7 に見られるように、MSM からのデータは PDH を介してクラウドで利用できる段階となった。現場での実証実験を完了して、Level 6 となっている。

■ 重量物高度操作：人機一体 九州大学 日本信号 JR西日本

2022年度 JR西日本プロジェクト実験時にIoT実証実験
複雑形状重量物（20Kg～100Kg程度）ハンドリング

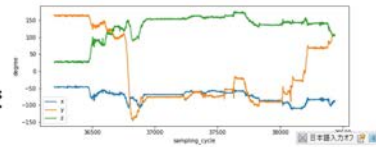


2022.5.20人機一体との共同実験 (JR西日本草津駅)



右腕部分にMSMを装着
作業時の姿勢、加速度を計測
道具利用成功と失敗（落とすなど）のデータの比較

インハンドマニピュレーション実験
人機一体/九州大学



人機一体 九州大学

図表 2-(5)-7 人機一体エンドエフェクタ実証実験例その1

・ 大規模食堂食器回収システム

大規模食堂では食事時間が限定された条件で多数の食器を回収して、高速の大型食洗機で洗浄する。その前処理は、残飯の整理、食器の種類分けを高速（1食器 0.5 秒）に作業する必要がある。返却状態では、トレイ上に液体を含む残飯が食器に存在し、食器の種類も 10 種程度ある場合が多い。さらに、箸、ごみ、忘れ物なども存在する。このような環境の中で、対象食器を認識して、対象食器のみを高速で把持して取り上げる作業を行う。対象食器の認識は画像の深層学習を食堂利用者自身が行う方法を提案した。エンドエフェクタは、剛体把持部に摩擦安定化材料を利用しては把持の確実性を確保した。(図表 2-(5)-8)



図表 2-(5)-8 大規模食堂の食器回収システム

剛体の指部は、ロボットアームに直接的に機械接続されず、空気圧ベローズを介してロボットと繋がっている。これによって、高速ハンドリングに、エンドエフェクタが、食器やトレイなどに衝突してもロボットや食器など接触物に損傷を与えない構造となる。全体の状況は MSM 内部のセンサから PDH を通じてクラウドでデータ蓄積され、異常診断なども可能となっている。現場での実証実験を完了して、Level 6 となっている。

・小規模レストランの食器洗浄システム

小規模レストランのバックヤードでは、作業空間が狭く大型ロボットを設置することが困難である。また、食洗機は小型のボックス型が多く利用されるが、食器の取り入れと取り出しに各 1 台ロボットアームを利用すると空間問題以外に、全体システムの価格の増加を招き、大きな導入障壁となる。

そこで、本プロジェクトでは、小型ロボット（4kg 可搬ロボット）を 1 台利用して、食器の食洗機への投入と取り出しの両方の作業を実現する。小型ロボットを利用することで、バックヤードの狭い空間内での人に与える威圧感はすくなる効果も生み出された。一方、市販の産業用ロボットを利用すると稼働範囲が小さくなるので、グリッパ部の到達距離を大きくするために、エンドエフェクタ全体を長くしている。軽量の空気圧駆動のグリッパを利用しているため、可搬重要に問題は発生していない。現場では、ロボットの不具合で作業が中断されることは許されない場合が多い。本システムのロボットは床にアンカー打ちして固定せず、移動可能となっており、問題発生時には作業者が代行できる方式である。

図表 2-(5)-9 に見られるように投入作業時は、食器は種々の残飯が付着した状態であり、食洗後の食器と同じエンドエフェクタを利用すると衛生上の問題が発生する。そこで、ここではエンドエフェクタを食器投入と取り出しで交換する。さらに、食洗機用のトレイを移動する際には稼働空間を確保するために短いエンドエフェクタに取り替えている。合計 3 種類のエンドエフェクタを利用している。エンドエフェクタ内部に、MSM が搭載されており、無線により PDH とデータ転送が可能となり、クラウドデータとして利用できる。

エンドエフェクタ先端のグリッパ部は、ベローズアクチュエータを利用した構造であり、剛体部が柔軟なベローズ部と連結されているので、指先が食器に接触した際にもロボットや食器に損傷を与えないようにしている。把持部には摩擦を安定化させる材料のシートを利用している。お椀形状の対象物は、食洗機用トレイに裏向きに入れる場合があるので、グリッパで把持した後に一旦食器を裏返しに設置し、エンドエフェクタの吸着パッドで吸着して食洗機トレイに設定する。このためグリッパ部には吸着パッドも装着している。圧力センサ、フローセンサなどは離れたところに設置できるので、グリッパ部にはセンサなどを

設置していない。このためグリッパは食器を把持した状態で水没可能となっている。食器の認識には画像の深層学習を利用し、ロボットアームの位置制御には、チトセロボティクスで開発している視覚フィードバック制御を利用している。

現場での実証実験を完了して、Level 6 となっている。



図表 2-(5)-9 小規模レストランの食器洗浄システム

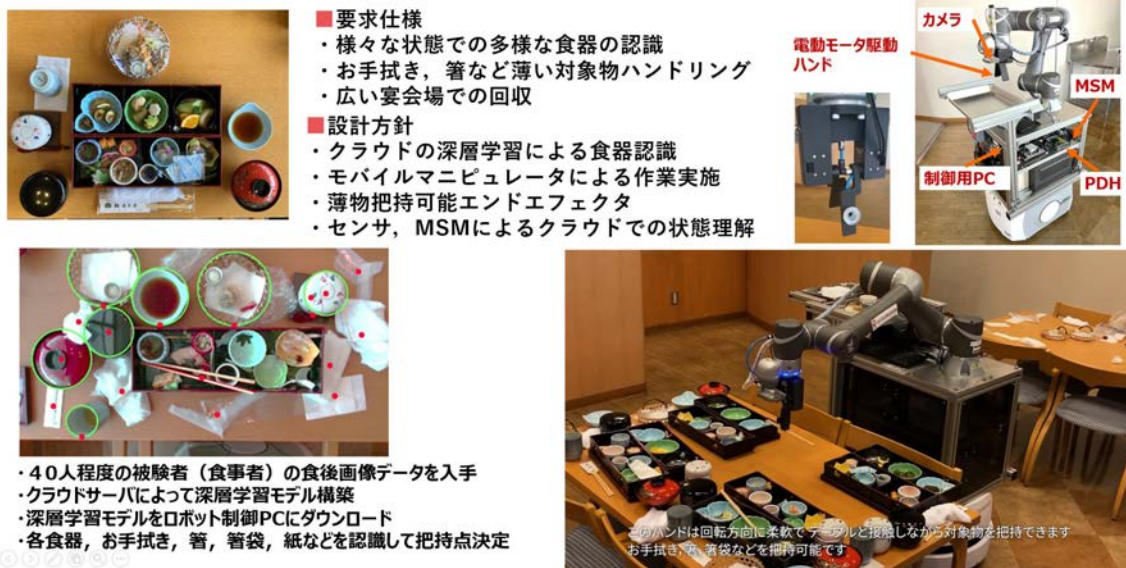
・ レストラン下膳システム

宴会後のレストランの下膳作業を移動マニピュレータによって実現する。食後のテーブル上には、図表 2-(5)-10 に見られるように種々の食器、お手拭き、お手拭きの袋、箸、箸袋、その他が混在して乱雑な状態で残っている。この中で、共通する対象物はすべて回収対象とする。対象物の認識は、後述する画像の深層学習によって実施する。

移動ロボットとロボットアームを組み合わせたシステムを構築し、本研究で設計製作したエンドエフェクタを搭載する。このエンドエフェクタは摩擦の少ないギアをモータで駆動する方式であり、バックドライブ可能となるので、テーブルに接触しながら対象物を把持できる。このため、テーブルに置かれたお手拭きや高さの低い箸などを把持可能となる。吸着パッドも指に装着されているので、蓋などの回収も可能である。

本体に MSM と PDF が搭載され、移動ロボットの振動、アームの動きなどのデータが入手でき、クラウドでの解析が可能となっている。

現場での実証実験を完了して、Level 6 となっている。



図表 2-(5)-10 レストラン下膳システム

・ レストラン盛り付けシステム

レストランバックヤードでは短時間に多くの皿の盛り付けを行う場合がある。ここでは、図表 2-(5)-11 に見られるように、天ぷらと煮物の盛り付け作業の自動化を対象とした。

対象食品の盛り付け位置姿勢の目標値は、熟練者からの情報をもとに機械知能で実現する方法を開発した。画像の深層学習により対象食品の種類を認識した。



図表 2-(5)-11 レストラン盛り付けシステム

エンドエフェクタはモータ 1 個の駆動として、摩擦の小さいギアを利用する方式によって、センサを利用せずに一定の精度での反力計測を電流値から実現した。また、指先は種々の方式を検討して、細線の集合体で食品との接触点を多くする方式を開発した。

エンドエフェクタ部に MSM が搭載され、作業中の振動、温度などのデータはロボットベース部の PDF に送られ、クラウドでのデータ解析が可能となっている。現場での実証実験を完了して、Level 6 となっている。

・病院などでの食器/トレイ食洗後回収システム

病院や介護施設などでは、大量の食器の食洗作業を高速で実施する機会が多い。このような作業と実現するバックヤードでは、アンカー打ちで固定することはコスト面からも望ましくない。設置のみでロボットアームを高速で動作させるとベースが移動するので通常の教示再生方式で手先位置精度を保証できない。ここでは、視覚フィードバック制御を利用してこの問題を解決している。本作業では食洗後の食器の回収であるので、エンドエフェクタは、吸着パッドを複数利用する方式を開発した。

ロボットの状態を MSM や PDH などを利用してクラウドデータとすることで、CPS を構築した。図表 2-(5)-12 に示されるように、現場での実証実験を 4 ヶ月程度実施して、実際に発生したトラブルをすべて遠隔から解消した。また、クラウドデータからロボットの運動軌道を修正することによって作業時間の短縮が実現できた。

現場での実証実験を完了して、Level 6 は達成し、Level 7 となる技術水準であるが現時点(2022年11月末)ではユーザ企業の事業化の経営判断待ちである。

CPS活用例 1 : コック異常と即時復帰

- ・空気圧異常低下を検知。
圧力値が正常/異常を判断して復帰指示。
- ・原因は、作業者のコック締め忘れ。



- ・埼玉医科大学病院でのトレイ洗浄業務の様子。
2名の作業者を自動化・省人化。
- ・現場は600床を有する病院で、
約2,000枚/日のトレイを洗浄。

チトセロボティクス

CPS活用例 2 : 運用ルール改良

- ・理由不明の緊急停止が頻発。
異常停止時、付近に人影がある。
- ・ログデータから原因究明。
Tシャツ袖がセンサにかかっていた



4ヶ月程度運転して、トラブルは遠隔から解決

活用例 3 : 運動軌道の変更

- ・0.1秒でもタクトタイムを短縮したいとの要望。
- ・ログデータから余計な運動を洗い出し、
軌道を変更して高速化。



もともと、2.2秒/枚のタクトタイムで顧客要件は満たしていた。

加速度変化を見直し、軌道を変更
タクトタイム0.4秒短縮を実現。

図表 2-(5)-12 病院などでの食器/トレイ食洗後回収システム

④ 達成度（2）

(i) 社会実装のための組織作り

本プロジェクトでは事業化推進事務局を中心に、社会実装のための組織作りを行ってきた。協力支援企業などは約 150 社となり、図表 2-(5)-13 に見られるような地域別の公開シンポジウムも開催してきた。

北海道：経済産業省 北海道経済産業局 公益財団法人 北海道科学技術総合振興センター
山形：経済産業省 東北経済産業局 山形県 産業労働部
滋賀県：産業支援プラザ 和歌山県：工業技術センター
広島・鳥取：経済産業省 中国経済産業局 広島県立総合技術研究所 食品工業技術センター
地方独立行政法人 鳥取県産業技術センター
九州：経済産業省 九州経済産業局 北九州市 産業経済局 長崎県 産業労働部
公益財団法人北九州産業学術推進機構 内閣府 沖縄総合局

エリア別シンポジウム開催

【北海道 開催地：札幌市】ロボティクス/IoT/AI技術は食産業にどのように貢献できるか？

開催日：2022年5月31日（火）13:30～16:00

協力：公益財団法人北海道科学技術総合振興センター（ノーステック財団）

対象者：大手ロボットメーカー、地元ユーザー・SIer・農林水産・官庁・自治体 関係者

参加者：230名（現地出席者+オンライン登録者）

【中国 開催地：広島市】ロボット技術の新分野展開を可能とするエンドエフェクタとは？

開催日：2022年9月1日（木）13:00～17:00

協力：経済産業省 中国経済産業局

参加者：315名（現地出席者+オンライン登録者）

対象者：地元ユーザー・SIer・官庁・自治体 関係者

【九州 開催地：博多市】「多様な対象物の認識とハンドリング」

開催日：2022年11月24日（木）13:00～17:00予定

後援：経済産業省 九州経済産業局

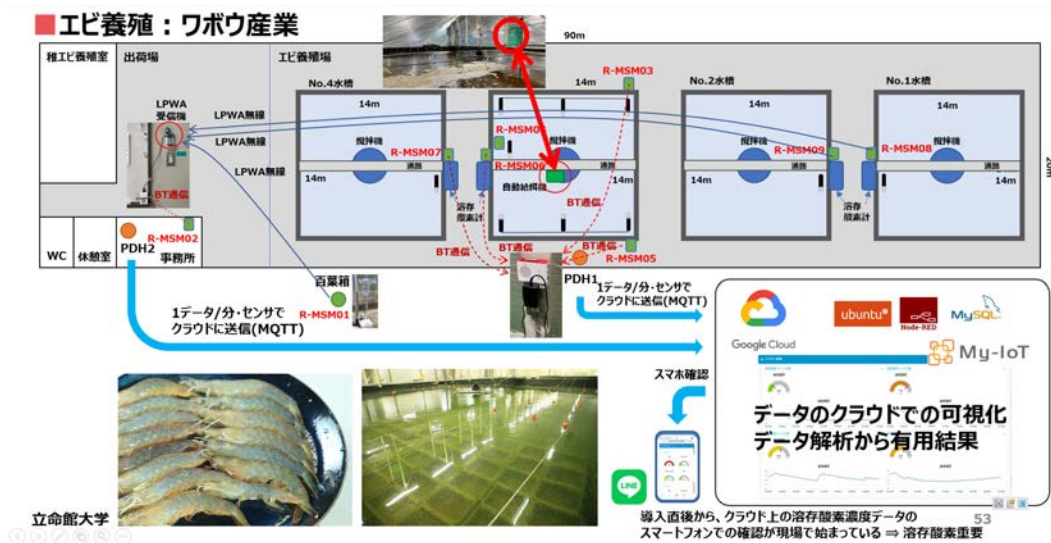


図表 2-(5)-13 地域別公開シンポジウム

また、各地域やユーザとの情報交換も実施してきた。（詳細割愛）これらの活動を通じて、後述の公開シンポジウム全体（2019年～2022年）の累積参加人数は3000人を超えている。今後は、本プロジェクトの成果の社会実装を促進するために、エッジプラットフォームコンソーシアム（EPFC）と産業用ハンドリングシステムアライアンス（IHaSA）（一般社団法人 iRooB0 Network Forum 内に設置済み）に成果内容を公開し、さらなる情報交換、共同研究開発などを実施する。

(ii) MSM/PDH/クラウドのシステム

- ・MSM/PDHの製造販売については、ワボウ電子が事業化を決定し、2023年度以後は発注あれば販売可能となる。
- ・実証実験先ユーザ約50カ所では、本システムの継続利用が予定される。たとえば、図表 2-(5)-14 ではエビ養殖の実証実験を示している。MSMとPDHを利用してデータの可視化から解析を実施して有用な結果を得ている。また、すでに30カ所では利用が開始されて、現在も利用を呼びかけているので、2022年度終了時点では50程度の利用例が生まれると予想される。



図表 2-(5)-14 エビ養殖実証実験例

- ・ 3 年間程度は本設計内容について立命館大学関係者が対応する体制を構築した。
- ・ 推進協力企業の IoT-Sier からユーザ数を拡大する予定である。たとえば、推進協力企業の Mountain Gorilla では、2022 年度 2 ユーザから 26 年度目標を 160 ユーザ としている。また、推進協力企業で山形県の ViAR&E は 2022 年度で 20 ユーザ程度を実施している。2022 年度末までにこのような IoT-Sier を 10 社程度に増加予定である。
- ・ 新規 IoT-Sier 育成活動としては、YouTube での利用方法の紹介、HP での利用方法、利用例など紹介 (EPFC、IHaSA)、展示会等での利用方法/利用例の紹介、電気/機械分野の定年退職者からの IoT 人材育成活動などを実施する。すでに、滋賀県産業支援プラザとの人材育成の具体的内容が決定しつつある。

(iii) EE/Robot/MSM/PDH/クラウドのシステム

- ・ 2022 年度終了時の成果を EPFC や IHaSA などを通じて公開し、事業化企業を募る。その際、内容によって、協力と競争の切り分けを明確にすることにより普及促進を加速する。
- ・ 3 年間程度は本設計内容について立命館大学関係者が対応する体制を構築した。また、可能な限り、企業からの個別質問や要望に答えるために、実験システムを含む体制を立命館大学内に確保する。
- ・ 他の組織、プロジェクトに協力して、本成果の社会実現数を拡大する。現在、ロボット革命イニシアティブ (RRI)、日本食品機械工業会、日本惣菜協会、近畿経済産業局、ホクレン、北海道立総合研究機構などと協議を開始している。

- ・ チトセロボティクスでは、図表 2-(5)-12 の食器取り出し作業は事業化可能段階であり、検討が進んでいる状況である。また、図表 2-(5)-9 の食器の取り入れと取り出し作業では、多くの新規性の高い技術が含まれている。個別の目的に応じて、必要な技術を選び出してユーザと Sier に提供する。

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

特許

国内特許数 18 件、国際特許 1 件となっている。国際特許については、現在 PCT 出願する内容を精査中であり、適切な内容を国際特許とする予定である。

オープンクローズ戦略

- ・ デバイス設計、システム設計、ソフトウェア等をオープン化（EPFC、iRooBO（IHaSA））で公開する。
- ・ オープン技術を基盤に特定目的に特化した技術は各企業でクローズとして競争領域とする。

例：ワボウ電子

MSM/PDH の設計方法はオープン技術で他の企業も同じ製品を製造販売可能である。一方、個別ニーズ対応や耐久性向上技術などは企業内でクローズとする。

MSM/PDH/クラウドのシステム

デファクト・スタンダード戦略とする。IoT 化が遅れている中小零細企業等に、50 件程度の実証実験を開始しているので、継続利用となる。これを基盤に、利用者数を実施的に増加させて、スタンダード化を図る。これにより、安価で利用容易な CPS を構築する。

⑥ 成果の対外的発信

・ 公開シンポジウム

毎年、本グループ全体の成果発表の目的で、図表 2-(5)-15 に見られるように公開シンポジウムを開催してきた。毎回、半数以上は企業関係者であり、この分野の社会的ニーズの高さが理解できる。聴講者のアンケートでは、有用であったとのコメントと実用化への期待の内容が多い状況となった。



図表 2-(5)-15 公開シンポジウム

・ 講演会や展示会

自主的出展も含まれるが、各種業界団体などからの依頼企画が多く、労働力不足の問題の深刻さを表している。招待講演、展示会など本プロジェクト実施期間中に100程度の参加状況となっている。

・ HP/YouTube

プロジェクト全体のHPおよびYouTubeで、講演内容動画や成果内容を公開している。R-GPS (MSM/PDH) の利用方法については、YouTubeでも公開しており、北海道、山形県、沖縄県などの遠隔地での利用に役立っている。

⑦ 国際的な取組・情報発信

LF-Edgeではブループリントを作成して、国際的なパートナー作りを実現している。学術的な成果を、著名な国際ジャーナルや国際会議に投稿している。国際ジャーナルの特集号の企画や国際共同研究も進みつつある。2022年度中に成果の国際情報発信が増加すると思われる。

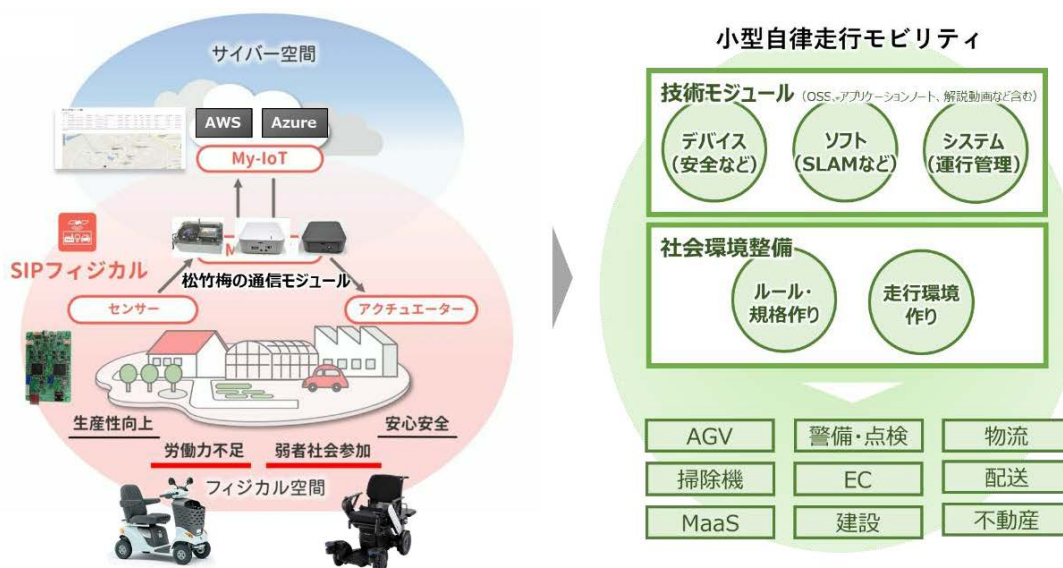
(6) 研究テーマ：移動空間デジタルデータのエッジ処理とクラウド連携による安心・安全・安価な複数台自動走行パーソナルモビリティの社会実装
 代表事業者：パナソニック、スズキ、産業技術総合研究所、東京大学

1) 研究内容

従来の人手不足の解消に加え、新型コロナウイルス対策として非接触もしくは距離確保した状態での移動が期待される中で、『誰もが行きたいところへ不自由・不安なく安全に行ける社会』の実現するための低速(6km/h)・近距離(1km)・低コスト(100万円/台)な移動手段をハード、システム、サービスのいずれのレイヤーでも提供することを目的とする。

技術的には、人共存環境(無秩序に人が動く屋内や屋外歩道など)で移動するモビリティに関して、人の特性を考慮した安全性の確保と効率的な移動を両立する新技術を確立する。また、小型の自律走行モビリティに必要な機体PF、ソフト、デバイスをモジュール化、オープン化し、さらにMy IoTなどの連携によりエッジとしてのロボットのサービス開発環境を構築する。

このような技術開発により、人手不足が本格化している物流、掃除、警備など様々な用途で活用可能な技術を横展開できるようにし、屋内外の小型移動ロボット開発およびサービス開発の参入障壁コストを1/10に低下させることを目指す。



図表 2-(6)-1 研究内容の概要

2) 技術的目標

前述した目的を実現するために、B2B顧客(商業施設ニーズ：人手不足・非接

触) / B2G 顧客 (自治体ニーズ: 買い物難民、非接触) が求める移動の「安全性」と「移動効率」の「安価」な両立を、自動車の自動運転技術より障害物などへの距離が近く (cm~m オーダ) かつ複雑に移動する物体が存在する人共存環境で実現する。

具体的には、

- ① リアルタイムエッジ安全技術
- ② リアルタイム人共存自律移動ソフト
- ③ 基盤技術 (協調領域)

の3つの技術開発について取り組む。それぞれの技術についての開発項目および2022年度末の目標を以下に示す。

図表 2-(6)-2 技術的目標

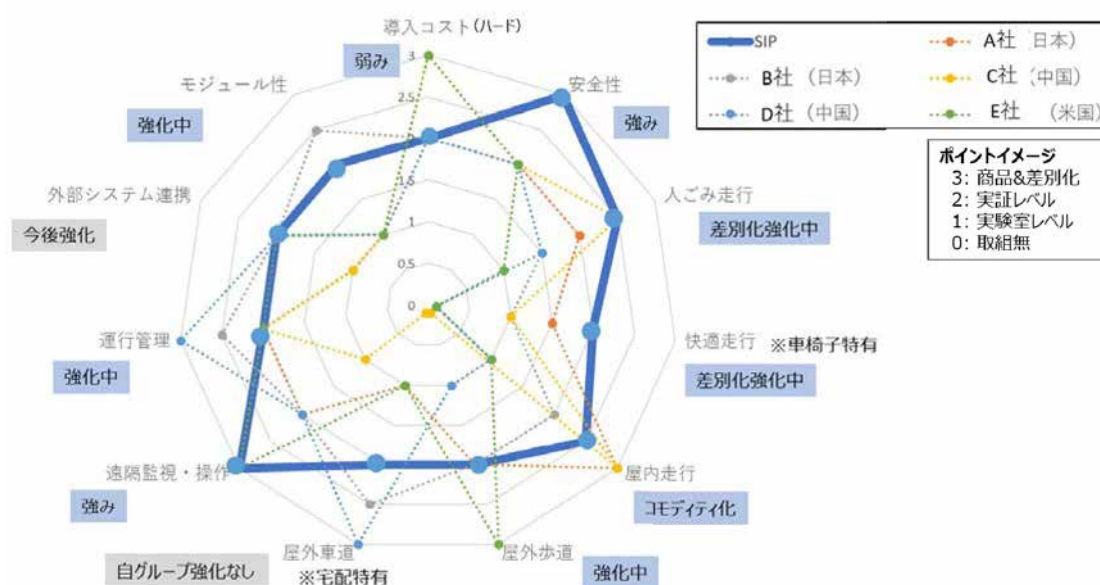
研究開発内容	開発項目	開発目標
① リアルタイムエッジ安全技術 (モジュール事業)	【安全】自律走行モビリティの最も重要な安全性 (衝突防止、転落防止) の実現。特に転落防止に焦点。(パナ)	衝突防止に加えて、転落防止も国際安全規格ISO 13482に準拠(SIL2)
② リアルタイム人共存自律移動ソフト (モジュール事業)	【屋内位置推定】屋外でのGPSに代わりうる屋内での大局的な位置・姿勢推定を行うエッジ技術開発 (パナ)	カメラを用いて自己位置100mm、方向15degの精度を空港などで確認 (10月予備実験では性能確認)
	【環境認識】モビリティが歩行者空間を安全に走行するため、周辺の歩行者、自転車、自動車や交通標識等の認識とその3次元位置・姿勢を推定 (産総研)	動的環境下において85%以上の認識率と1m以内の誤差
	【経路生成】交通ルール遵守や障害物回避といった対環境危険回避行動と、他の歩行者への配慮など対人行動生成 (産総研)	周囲の人の行動予測に合わせ50cmの衝突マージンを確保した安全な経路生成
③ 基盤技術 (協調領域)	【機体開発】CPS用通信モジュールを装備し、ステアバイワイヤ構造を基本とした自動走行屋外用モビリティの開発 (スズキ)	ステアバイワイヤ機構を搭載した自動走行屋外モビリティ(CPS通信モジュール装備)
	【運用システム】複数ロボットのための全体最適化 複数ロボットが情報を共有しながら、配車・配送といったサービスを効率的に実施するため、エッジクラウド連携基盤技術を開発 (パナ・産総研)	全体最適化アルゴリズムとセンサユニットからの情報収集システムとを統合した屋内外配車・配送サービス運用
	【評価手法構築】実際の生活空間での走行データや事故発生状況の分析結果に基づく自律運転試験フィールドの設計 (東大)	自律システムの仕様決定や安全規格の基準となる評価試験方法の作成

3) 課題目標の達成度

①国際競争力

現時点では、人共存環境でも確実に動く移動性能と安全性の両立できる自律移動技術のモジュール化を推進している。安全性や自律移動に関して、例えば、世界初の機能安全に適合したサービスロボット向けのモジュールや他社比25倍の性能を有する自律移動用ソフトウェアなどの業界初の成果やトップカンファレンス採択済の成果を創出しており、現時点での国際競争力が高い。これらの成果に対して、グローバル企業からの活用要望依頼等も受けており、客観的にもその性能を評価頂けるレベルとなっており、対計画としての目標レベルは十分に達成している。また、後述するように国際規格化に向けての活動開始もしている。

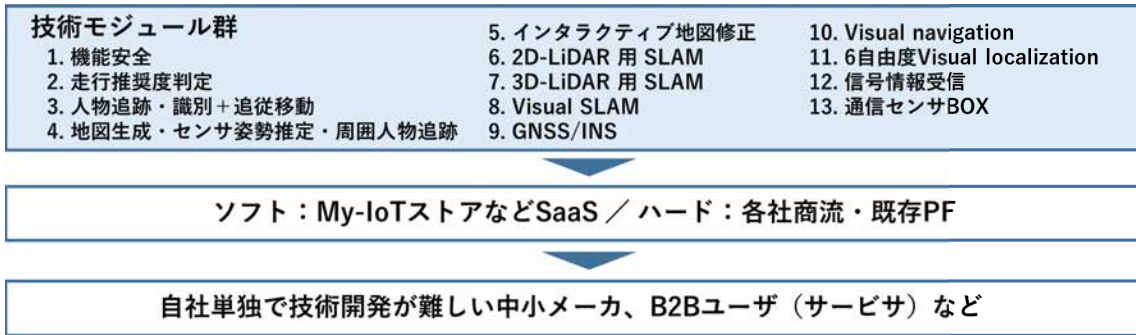
一方、今後の動向を考慮すると、エッジの移動技術に関しては、グローバルな競争が激化している領域である。屋内領域（特に、本 SIP で対象とする小型モビリティよりも更に小型で、人と衝突しても大きな危害がない超小型モビリティ）は、技術としてのコモディティ化が進むと見込まれ、また、屋外領域は米国、中国のスタートアップ・大手企業が参入した状態での競争の激化が予想されている。このような中で、人共存環境での安全技術をコアとして、人ごみ・快適走行などヒューマンインタラクションを伴うソフト技術を強化していくだけでは十分な競争力維持は難しいと考えられ、低遅延でユーザビリティの高い遠隔運用システムや複数のモビリティを管理できる運行管理システム、上位の基幹システムとの接続性向上などを行い、システムインテグレーション費用、オペレーション費用なども含めた総コストの低減に関する技術開発を行うことで、競争力の優位性を維持していく。



図表 2-(6)-3 ベンチマーク

② 研究成果で期待される波及効果

パーソナルモビリティを活用した近距離と自動車などの中距離連動により「真のラストマイル」問題の解決を通して、人共存環境（無秩序に人が動く屋内や屋外歩道など）で移動するモビリティの人特性を考慮した安全確保と効率的移動動作に関する新技術を確立した。さらに、それらの移動技術を移動支援に加え、搬送、警備、掃除など幅広い事業に横展開可能なようなモジュールとして蓄積し、後述するように実際のインテグレータ、サービサー、デベロッパーなどのユーザとの実証活動を通じて、モジュールとしての有効性を示し、技術的な波及効果を実現した。

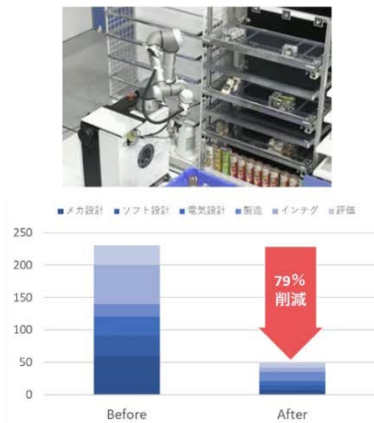


図表 2-(6)-5 自律走行技術をモジュール化と My-IoT ストア

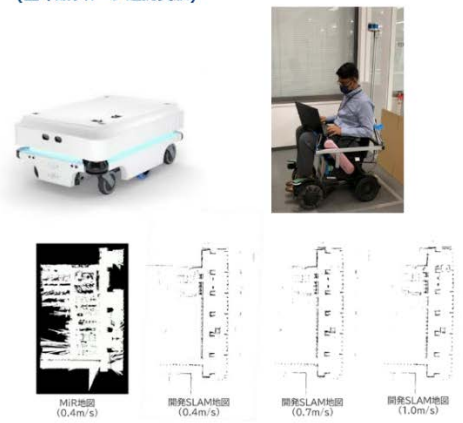
事業的な波及効果としては、横展開可能なモジュールを構築することで、500億円程度の市場規模の事業創出効果ができる。また、レベル 4 自動運転の移動ロボットに必要な機体 PF・ソフト・デバイスモジュールをオープン化し、さらに My IoT などの連携によりエッジとしてのロボットのサービス開発環境を構築することができた。

これにより、屋内外の移動ロボット開発およびサービス開発のコスト（開発工数）を 1/5 や 1/3 などに低下することを、大学などとの評価試験により確認できており、経済的な観点でも十分に波及効果が見込まれる。

■モバイルマニピュレータの開発事例において、開発効率化（約1/5）の効果を検証



■自律移動ロボットの地図作成において、他社製品比 約1/3の作業時間となることを確認 (立命館グループ連携実験)



図表 2-(6)-4 開発工数の削減効果

これらの技術的、事業的な波及効果を踏まえて、パーソナルモビリティの自動運転を社会実装することで、交通弱者も含めて、誰もが移動の不自由の感じない社会への貢献（自動走行や自動回収を活用したシェアリングなどにより地域のインフラへの展開を含む）や、更には掃除、警備、配送などにおける人手不足解

消／業務非接触化への貢献を行うことが可能になり、社会的にも大きな波及効果を実現するものである。

③達成度（１）

リアルタイムエッジ安全技術、リアルタイム人共存自律移動技術、基盤技術といった最重要技術のコア技術に関しては、2020年度までに開発に実験室レベルで要素技術の開発を完了した。その上で、2021年度、2022年度はそれまでに開発した要素技術を実際の利用環境において評価し、その完成度・信頼性を評価するとともに、実用化に向けた課題抽出を行った。このような活動の中で、実際の環境においても、設定した目標を十分に達成していることを確認した。

図表 2-(6)-6 技術的目標の達成度

研究開発内容	開発項目	最終目標スペック	
① リアルタイムエッジ安全技術 (モジュール事業)	【安全】自律走行モビリティの最も重要な安全性（衝突防止、転落防止）の実現。特に転落防止に焦点。（パナ）	○	衝突防止に加えて、転落防止も国際安全規格ISO 13482に準拠(SIL2)
	【屋内位置推定】屋外でのGPSに代わりうる屋内での大局的な位置・姿勢推定を行うエッジ技術開発（パナ）	○	カメラを用いて自己位置100mm、方向15degの精度を空港などで確認
② リアルタイム人共存自律移動ソフト (モジュール事業)	【環境認識】モビリティが歩行者空間を安全に走行するため、周辺の歩行者、自転車、自動車や交通標識等の認識とその3次元位置・姿勢を推定（産総研）	○	動的環境下において85%以上の認識率と1m以内の誤差
	【経路生成】交通ルール遵守や障害物回避といった対環境危険回避行動と、他の歩行者への配慮など対人行動生成（産総研）	○	周囲の人の行動予測に合わせ50cmの衝突マージンを確保した安全な経路生成
	【機体開発】CPS用通信モジュールを装備し、ステアバイワイヤ構造を基本とした自動走行屋外用モビリティの開発（スズキ）	○	ステアバイワイヤ機構を搭載した自動走行屋外用モビリティ(CPS通信モジュール装備)
③ 基盤技術 (協調領域)	【運用システム】複数ロボットのための全体最適化 複数ロボットが情報を共有しながら、配車・配送といったサービスを効率的に実施するため、エッジクラウド連携基盤技術を開発（パナ・産総研）	○	全体最適化アルゴリズムとセンサユニットからの情報収集システムとを統合した屋内外配車・配送サービス運用
	【評価手法構築】実際の生活空間での走行データや事故発生状況の分析結果に基づく自律運転試験フィールドの設計（東大）	○	自律システムの仕様決定や安全規格の基準となる評価試験方法の作成

代表的な成果を以下に示す。

例えば、リアルタイムの安全技術に関しては、国際安全規格である ISO13482 に機能安全（SIL2）で業界初適合したモジュールを開発するとともに、実際の空港でのユーザによるオペレーション評価により、他社と比較して高い安全性を確保できていることを確認できた。また、リアルタイムの人共存自律移動の技術に関しては、深層学習を活用することで周辺の人／自動車などのクラス、位置-姿勢を同時認識（90%）で達成する周辺環境の認識技術や自律移動の基本のなる SLAM 技術において、計算量を大幅に削減しながら、位置精度を保ち続けることができ、500-1000Hz でのオドメトリ計算が可能となる独自技術を開発し、国際学会などにおいても高い評価を受けている。このような自律移動技術を用いて、実際の大学キャンパスにおける巡回バスサービス実証などを行い、実際の環境において安定、安全に走行が可能であることを確認することができた。

また、東京大学内には路面、道路境界、道路幅の設定が可能な模擬的な評価環境を構築し、モビリティ走行時の走行リスクなどを定量的に評価できる技術を開発するとともに、それらのデータを規格化やルール整備に活用できるような仕組みを構築した。

<p>●リアルタイム安全</p>  <p>国際安全規格ISO13482に機能安全で業界初対応 (SIL2) 実際の空港でのオペレーション評価により、他社比較して高い安全性確保</p>	<p>業界初</p>	<p>●リアルタイム安全</p>  <p>深層学習を利用したセマンティックセグメンテーションにより、リアルタイムの走行推奨ルート選択技術 特に、道路境界が不明瞭な環境で有用 (正答率90%)</p>	<p>TOP学会</p>
<p>●リアルタイム人ごみ走行</p>  <p>深層学習により、周辺の人/自動車などのクラス、位置-姿勢を同時認識 (90%) 周辺歩行者への配慮に基づく安全な行動生成 (行動予測に合わせ50cmマージン確保)</p>	<p>TOP学会</p>	<p>●リアルタイム人ごみ走行</p>  <p>計算量の削減しながら位置精度を保ち続けることができるSLAM技術 500-1000Hzでのオドメトリ演算が可能</p>	<p>TOP学会</p>
<p>●複数台運用システム最適化</p>  <p>配車要求・最適化配車計画・配車指示・状態管理等をクラウドサーバ上に構築 10台接続可能</p>	<p>My-IoT</p>	<p>●屋外走行評価手法構築</p>  <p>東大柏キャンパス内にリスク評価により抽出された評価試験路を設定 (路面、道路境界、道路幅の設定が可能)</p>	<p>標準化</p>

図表 2-(6)-7 具体的な成果事例

最先端の技術開発だけでなく、より広く SIP の成果を普及させるため、また SIP 内の連携を加速するために、SIP プロジェクトで開発してきた My-IoT システムに簡単に繋がる通信 BOX モジュールの開発も行った。このモジュールは、モビリティなどに搭載されるセンサ情報をモビリティ側で一括取得し、My-IoT サーバに接続するものであり、その機能に応じて3種類 (中型、小型、センサユニット) のタイプの開発を行った。例えば、通信センサ BOX 中型は、防滴構造で LTE 通信モデムを内蔵し、My-IoT サーバへ直接自動接続可能となっており、モビリティに設置することで、データ取得、運行管理、他ユーザ情報・環境データ取得ができるようになっている。通信センサ BOX 小型は、バッテリー駆動で Wi-Fi 外部接続 (スマートフォン等) にて My-IoT へ接続できるようになっており、ユーザの生体情報取得、モビリティとの連携などが可能である。センサユニットに関しては、バッテリー駆動で Wi-Fi 外部接続にて通信センサ BOX (中型・小型) と接続し、情報伝送が可能となり、環境データの計測などに使用されることを想定している。このような機能・性能、価格が異なるものを準備することで、ユーザのアプリケーションや目的に応じて、最適に、そして、気軽に My-IoT を活用できるようになる。このモジュールは後述するように各種のユースケースで実際に活用されており、安定した性能が発揮されることを確認するとともに、仕様説明書、プログラム、サンプルデータなど各種ドキュメントなどをオープン化し、多くのユーザが利用できる状態になっている。



図表 2-(6)-8 My-IoT に接続可能な通信モジュールの事例

本プロジェクトでは、開発した要素技術を横展開可能なようにモジュール化／オープンソース化の取組みを積極的に推進した。

例えば、ソフトウェアモジュールの観点では、エッジデバイスによる画像認識プログラムの ROS 1 および ROS2 パッケージ化の作業を実施した。これ以外にも地図生成、点群位置合わせなど既に 10 個のレポジトリを GitHub 上でオープンソース (OSS) として公開し、お気に入りを表す Star の合計数は 3000 近くになっており、世界中の多くの利用者による活用が始まっている。

■ 3D LiDARを使った地図生成・センサ位置姿勢推定・周辺人物追跡 hdl_graph_slam



Fork: 637
Star: 1400

BSD 2ライセンスで運用

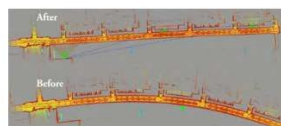
■ 高速高精度な点群位置合わせ fast_gicp



Fork: 219
Star: 700

BSD 3ライセンスで運用

■ インタラクティブ地図修正フレームワーク interactive_slam



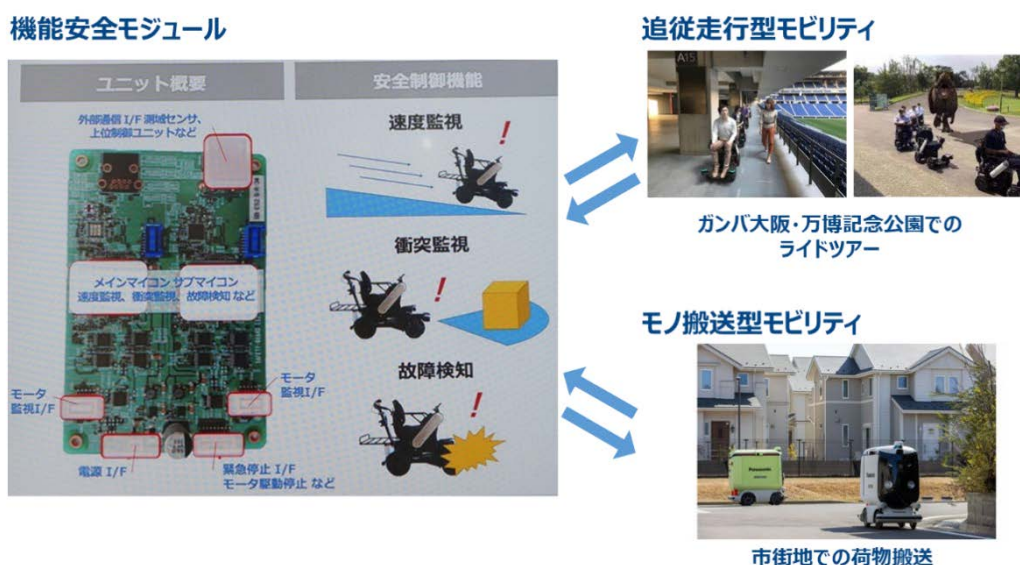
Fork: 199
Star: 605

OSSライセンスとしてはGPL 3.0で運用
(開示条項を嫌がる企業対応として
個別契約も用意したデュアルライセンス)

図表 2-(6)-9 開発したソフトウェアのオープン化実績

また、ソフトウェアだけでなく、ハードウェアモジュールにおいても、既に横展開の準備が始まっている。例えば、先述した機能安全 (SIL2) に適合可能な自動走行小型モビリティ用の安全制御モジュールに関しては、2021 年度、2022 年度

はパーソナルモビリティだけではなく、多くの自律移動ロボットへ展開し、横展開性やインタフェースの妥当性を検証した。具体的には、自律移動だけではなく、人が搭乗する追従走行型モビリティに適用し、スタジアムや観光地でのライドツアーにおいて評価を行い、実運用上問題ない性能を有していることを確認できた。また、人の移動だけではなく、モノの移動を行うアプリケーションに展開し、一般公道を含むエリアにおける配送業務などの長期間の実運用で活用し、信頼性などが確認されている。これらの評価により横展開性やインタフェースの妥当性を十分に確認するとともに、安全モジュールの活用により、従来よりも短時間で要求される安全レベルの担保ができ、実運用に移行できることを示した。



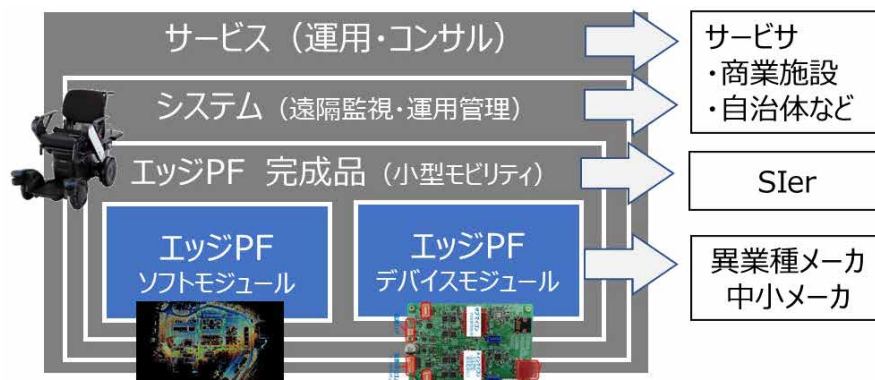
図表 2-(6)-10 機能安全モジュールの横展開

④達成度 (2)

本プロジェクトでは、開発された小型モビリティに必要な技術をモジュールとして社会実装することを目指している。具体的には、自律移動ソフトモジュールなどのソフトウェアモジュールは、基本的にはレポジトリでのコード共有化によりOSSとしてグローバル展開することを目指す。また、機能安全モジュールなどのデバイスモジュールに関しては、モジュールを車椅子、物流、警備、掃除などの複数のアプリケーションへ展開することを目指す。

このような SIP で開発した移動ロボットに必要な技術モジュールを、My-IoTストアなどにアップロードすることで、メーカー、サービサーや施設ユーザに幅広く使って頂けるような状態を目指すとともに、小型モビリティに必要なモジュール提供の事業 (2025 年 490 億円グローバル市場) を目論む。また、これらの

コアの社会実装だけではなく、モビリティ完成品としての社会実装やシステム・サービスとして社会実装を進めるための準備も並行して進める。



図表 2-(6)-11 社会実装技術と展開先の概要

ソフトウェアモジュールに関しては、前述したように既に 10 以上のレポジトリを OSS として公開しており、順調に活用実績が伸びている。また、オープン、そしてフリーでの提供に加え、開発モジュールに興味を持つ企業や大学など約 25 機関と社会実装に関する議論を行っており、既にメーカー・サービス・大学においてモジュール活用の実績が出始めている。

例えば、大手ゼネコン企業においては、施設内物流でのオフィス配送にむけて屋内配送ロボットの活用が行われ、安全モジュール搭載済みのモバイルベースを屋内で使用するとともに、ユーザ側でシステムと接続し、エレベータの搭乗を実施している。また、EC 企業においては、ネットスーパーの注文を自宅まで配送する取り組みの中で、安全モジュール搭載済みのモバイルベースを屋外で使用する取り組みが行われた。さらに、大学においては、研究・教育活動の一環として、小売店舗での作業自動化を目指したモバイルベースの活用が進められている。

このようなユーザによる評価の中で、「とにかく安全が担保されているというのは開発を進める上で大きい」「移動技術に掛ける開発工数を削減し、本来の差別化機能の開発できるのは有難い」というモジュールに対するポジティブな意見を取得できているだけでなく、「自社の基幹システムの接続性の改善ができると更に良い」といった改善点に関する要望を抽出することができている。

図表 2-(6)-12 社会実装に向けた実証状況

事業者	用途	利用方法 ○：引合い ●：活用済 ×：中止			
		製品・プロト	サービス	SI	教育
A社	車いす	○	○	○	○
B社	車いす	○			
C社	車いす	○	○	○	
D社	車いす	○			○
E社	掃除	○	○		
F社	草刈り	○			
G大学	車いす				○
H大学	店舗内配送				○
I社	工場配送	○			
J社	工場搬送	○			
K社	工場搬送	○			
L社	工場搬送	○			
M社	施設内搬送	●			
N社	MaaS		●		
O社	屋外搬送	●	●		
P社	建機	●			
Q社	地図作成		●		
R社	自動走行	●	●	●	
S大学	店舗作業				●
T病院	MaaS		○		
U社	MaaS		○		
V社	農業	○			
W大学	車いす				●
X社	自動車	●			
Y社	AR/VR		●		

このようにモジュールを提供し、他機関がモジュールを実証・評価するだけでなく、SIP内外の連携を活用しながら、自らがエッジからクラウドまでの一気通貫のMy-IoT活用CPSシステムを構築し、ユースケース全体を示す取り組みも進めている。

例えば、以下の3つのサービス事例を一気通貫システムとして創出した。

事例1：サイバー空間情報（公的情報）も活用したハイパーローカル熱中症データ収集

事例2：バスの待ち時間をゼロにするパーソナルモビリティの移動タイミング制御

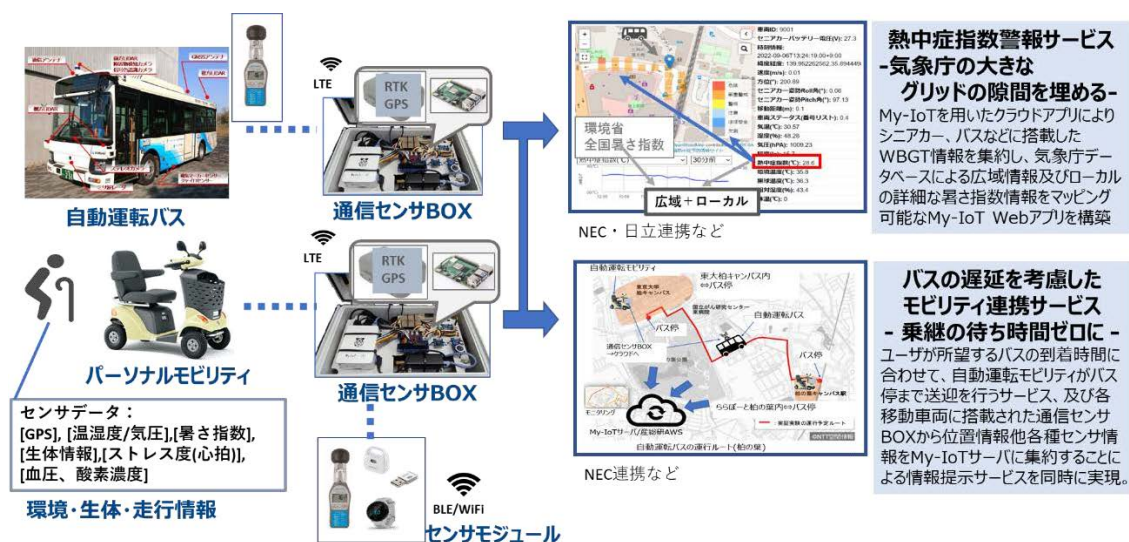
事例3：パーソナルヘルスケアデータを活用したリアルタイムモビリティ制御

事例1では、気象庁が発表する気象データのグリッドの隙間を埋める熱中症

指数警報サービスを提供するというアプリケーションを開発した。前述したような通信センサ BOX を活用することで、移動車両から取得できるセンサ情報を Node-Red を介して My-IoT サーバにアップロードし、My-IoT のダッシュボード上 Web アプリに、各種センサ情報のグラフ表示、ローカル WBGT 情報の地図表示、情報提供システムなどの開発を推進した。このようなシステムを活用することで、My-IoT を用いたクラウドアプリによりシニアカー、バスなど様々な移動体に搭載した熱中症に関する WBGT 情報を集約し、気象庁データベースによる広域情報及びローカルの詳細な暑さ指数情報をマッピング可能な My-IoT Web アプリを構築した。

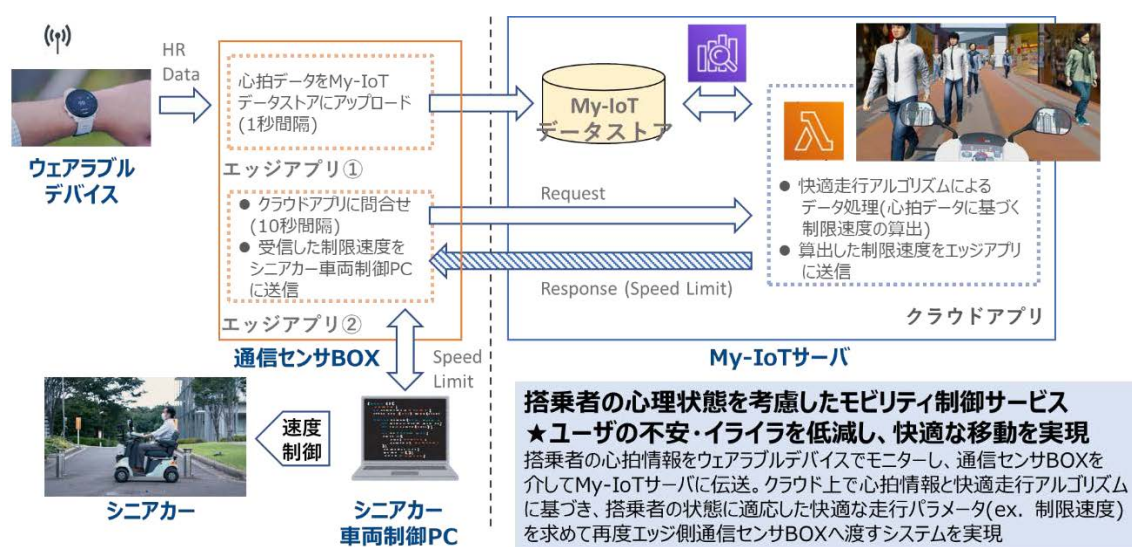
事例 2 では、「My-IoT にすぐにつながる通信センサ BOX」を柏の葉キャンパス駅から東京大学柏キャンパス間で運行中の自動運転バスと東京大学のキャンパス内を走行するシニアカーに搭載することで、バスの遅延を考慮した乗継の待ち時間ゼロのモビリティ連携サービスを提供している。このサービスでは、ユーザが所望するバスの到着時間に合わせて、自動運転モビリティがバス停まで送迎を行うサービス、及び各移動車両に搭載された通信センサ BOX から位置情報他各種センサ情報を My-IoT サーバに集約することによる情報提示サービスを同時に実現することに成功している。実証実験においては、バスの遅延状況などを考慮し、パーソナルモビリティ利用者がバス到着の 15 秒前に到着することが可能なことを確認し、モジュール技術の組合せによりエッジ情報を活用したストレスのない新しい MaaS アプリケーションが構築可能なことを示した。

事例 1 と 2 では、モビリティの位置・環境情報などのエッジ情報をサイバーで処理し、モビリティを制御する新しいサービス創出の検証することができた。



図表 2-(6)-13 一気通貫の CPS 事例（自動運転バス連携など）

事例3では、モビリティ利用者の心拍などのバイタルデータをサイバー空間で処理し、リアルタイムでモビリティを安心・快適に制御する CPS システムを構築した。具体的には、まず搭乗者の心拍情報をウェアラブルデバイスでモニターし、通信センサ BOX を介して1秒間隔で My-IoT サーバに伝送した。クラウド上では、伝送された心拍情報と独自に開発した快適走行アルゴリズムに基づき、搭乗者の状態に適応した快適な走行パラメータ(例えば、移動最高速度)を求めて、再度エッジ側通信センサ BOX へ動作指示を渡すシステムを実現した。これにより、搭乗者の身体状態や心理状態を考慮したモビリティ制御サービスを開発し、ユーザの不安・イライラを低減し、快適な移動を実現することができるようにした。



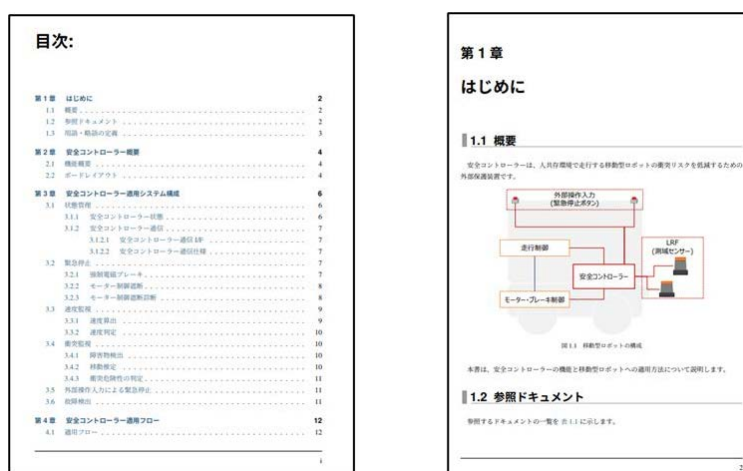
図表 2-(6)-14 一気通貫の CPS 事例 (ウェアラブル機器を用いたリアルタイムモビリティ制御)

さらに、このようなモジュールの開発やユーザ側での実証、さらには実例としての一気通貫の CPS システムのユースケース開発に留まるだけでなく、より簡単にユーザが利用できるようにすることで社会実装が加速できるような取り組みも進めている。特に、モジュールとして使いやすいインターフェースや取扱説明書などの準備が普及の肝と考え、広く一般の幅広い層が使いたいと思うようにするための紹介ビデオやアプリケーションノート(取説・事例紹介)の準備を進めている。

紹介ビデオに関しては、安全技術や SLAM 技術を紹介するエッジ技術編、通信技術、MaaS などの取り組みを紹介するクラウド技術編、そして、GPS のユースケースを紹介する GPS 一気通貫編の 3 種類を準備することで、幅広い領域のユーザ

が興味を持つような取組みを行った。また、取扱説明書の中では、システム構成や事例紹介ドキュメントをアプリケーションノートとして整備するとともに、ハードが伴うモジュールも可能な限り情報を開示することで利用しやすさを高めている。例えば、通信 BOX モジュールにおいては、デバイスの 3 次元データ、部品リスト、仕様説明資料、ラズベリーパイ用 My-IoT 接続プログラム、センサ情報取得プログラム、サンプルデータ形式（JSON フォーマット）、アプリケーションノートなどユーザが必要であろう一式の準備を行うようにしている。

以上のように社会実装に向けたモジュール化および横展開の取組み、さらには普及に向けた準備は順調に行われており、目標の達成レベルは高い。



図表 2-(6)-15 アプリケーションノートの事例

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

国際標準戦略に関しては、特に安全性などの規格化、基準作りを重点的に実施している。具体的には、2019 年度より国際規格化などの検討に参画しており、

- ・ 経産省委託事業 ロボット車椅子標準化調査委員会
- ・ ISO13482（ロボット安全規格）
- ・ IEC TC125（Personal e-Transporters）

の 3 つの活動を行った。

また、これらの活動とベースとして、東京大学においては、安全のリスク度合いに大きく関与する HIC 値（頭部負荷）などをシミュレータにより算出するソフトウェアを開発し、パナソニック、スズキがこれまでに蓄積してきた現場での危険事象を再現するとともに、危険度の評価、基準作成を行ってきた。



図表 2-(6)-16 模擬環境とシミュレーションによる安全性検証技術構築

さらに、ロボット革命イニシアティブ協議会にタスクフォースを設置し、メーカー／ユーザ企業で自律走行を行いやすいインフラ環境整備（エレベータ連動のための共通仕様など）の仕様整理に貢献した他、自律移動ロボットの走行環境の定義および走行性能の評価指標の検討を実施し、60名程度が参加するセミナーを開催することで関係者への周知を行った。このような活動は、2022年度の一般社団法人ロボットフレンドリー施設推進機構の設立などにも繋がり、SIP終了後も、ロボットが走行しやすい環境整備・規格化を推進していく体制を構築することができた。

また、規制改革に関しては、小型のモビリティが公道を走行するためのルール作りに関して、実証実験のデータなども活用しながら、関係省庁との議論に参画した。結果として、2021年度には警察庁から「特定自動配送ロボット等の公道実証実験に係る道路使用許可基準」が策定され、実証実験を実施する場所と同一または類似の環境で240時間以上の走行実績を持つなどの複数の条件を満たす自動配送ロボット、電動車椅子ロボットなどロボットを「特定自動配送ロボット」と定義し、これまでの道路使用許可の手続きを簡便化ができるようになった。2022年4月には「道路交通法の一部を改正する法律案」が可決され、「遠隔操作型小型車」などの新しい分類が制定されるとともに、歩行者と同様の交通ルール（歩道・路側帯の通行、横断歩道の通行等）が適用されるところまで、法制度の整備が進んだ。さらに、これらの動きを踏まえて、2021年11月には一般社団法人ロボットデリバリー協会を関連するメーカー、サービスとともに設立し、安全基準のガイドライン策定を進めるなどの活動を行っており、SIP終了後の社会実装に向けた制度面での環境整備を着実に進めることができた。



図表 2-(6)-17 移動ロボット普及に向けた業界団体設立の事例

⑥成果の対外的発信

SIP で開発した技術成果の発信・マーケティングを主目的として、つくばでの日本初の公道走行実証、JR 駅実証などの実証活用や国際ロボット展／CES などの展示会活動を行うなどの対外的な発信を実施している。BBC や日経など国内外の著名なメディアにも掲載が多数され、結果として、施設関係者、建機メーカーなど国内外の約 30 企業などから完成品・モジュールとも問い合わせを頂いている。

また、一般紙だけではなく、業界紙からも積極的に発信を行っており、観光業などこれまでに接点が少ないユーザへのアプローチを試みている。さらには、インフルエンサーや専用の YouTube チャンネルや Twitter アカウントの開設や顧客側からのリリースなども活用することで潜在需要の掘り起こしを行っている。

さらに、より具体的な連携機会の探索を主目的として、シンポジウム、学会、展示会、研究会での発表・発信・デモンストレーションを行ってきた。

例えば、シンポジウム「高齢者自立支援のためのモビリティアシストと物のラストワンマイル搬送」を開催（参加者：約 300 名）しており、具体的にマッチングできた企業とは NDA を締結し、事業性の FS を実施し、共同開発を行うに至っている。

学会活動では、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会においては、My-IoT を活用した自律走行のための技術モジュールに関するセッションを企画し、開発側、ユーザ側を含めて 10 件の発表を専門家に対して実施している。

展示会としては、スマートファクトリーJapan2022 において、My-IoT 通信モジュールを搭載した自律移動モビリティの実機展示を行い、来場者に対して訴求するとともに、モジュール利用に関して大学や SIer からの複数の引き合いを獲

得している。

さらに、研究会活動として、スマートシティの構築と推進に寄与する人材を育成することを目的とした東京大学 Smart City School においては、自動走行が可能な小型モビリティのデモンストレーションを実施し、デベロッパーなどの民間企業人材に対して訴求を継続的に行っている。

このようにメディアを通して広く一般に開発成果を発信するとともに、よりコアなユーザ候補に対しては、展示会など専門的な紹介、議論、デモンストレーションを行う場を活用することで深く発信を行うことができた。



システムインテグレーション
12月@幕張メッセ
ユーザ含めて10件発表セッションを企画



スマートファクトリー
10月@東京ビッグサイト
My-IoT通信モジュールなどをデモ



スマートシティ
11月～@東大柏キャンパス
ユースケースのショールーム展示

図表 2-(6)-18 専門家に向けた対外発信の事例

⑦国際的な取組・情報発信

国際的な取組に関しては、世界トップの学術会議などでの発表を通じた技術的新規性発信を行っている。これまでに 19 件の国際学会発表を行っており、画像系では CVPR (h5-index:356)、ICPR (h5-index:43) など、ロボット系では RAL (h5-index:74) 4 件、ICRA (h5-index:105) 3 件、IROS (h5-index:73) 5 件、RAS (h5-index:73) など画像処理技術、ロボット技術のトップ会議で発表を行っている。また、国際会議 ICSIM においては、2020 年、2021 年と連続で Special Session を行うほか、シンガポールで開催された AIBotics2022 においても自動走行するパーソナルモビリティや My-IoT を活用した MaaS の取組に関する情報発信を行っている。

海外との連携という観点では、ロボット革命イニシアティブ協議会において、海外連携を目的とした海外企業とのクローズドワークショップを実施したほか、東京オリンピックパラリンピック期間中においては、次期パリ大会を見据えて、フランスのクリュゼル障害者担当副大臣に対するデモンストレーションを実施

した。また、ロボット系の世界最大の OSS である ROS の業界団体である ROS industrial Asia Pacific Workshop において、自動走行の事例紹介を行うとともに、オープンソースの連携や活用に関する議論を実施するなど国際連携に関する取り組みを実施している。さらに、米国やアジアの個別企業も訪問し、NDA を締結の上、具体的な連携を探索するなど国際的な社会実装に向けて取り組みを推進している。



図表 2-(6)-19 国際連携の事例 (ROS-Industrial Asia Pacific ワークショップ)

このように技術開発成果の発信および事業開発、海外展開という観点でも複数の国際的な取り組みを実施してきた。

3 課題マネジメント

①Society5.0の実現を目指すもの

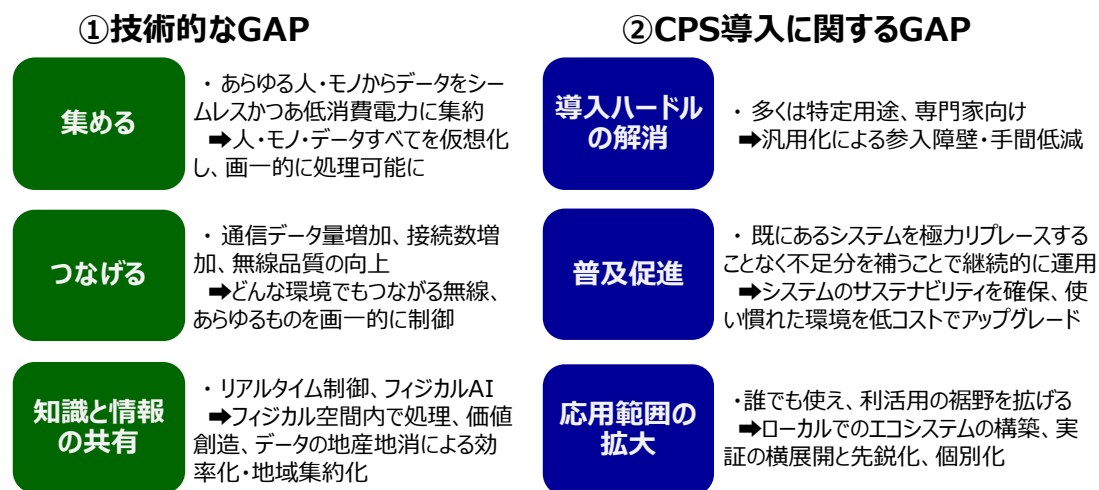
Society 5.0の実現には、デジタル革新に関連する次世代の各種技術が実際の産業や社会生活へ実装され広く活用されることが必要であり、具体的な出口を想定した研究開発が重要である。

Society 5.0実現のために、本事業においては①技術的なGAP、②CPS導入に関するGAPを解消する必要がある（図表3-1）。

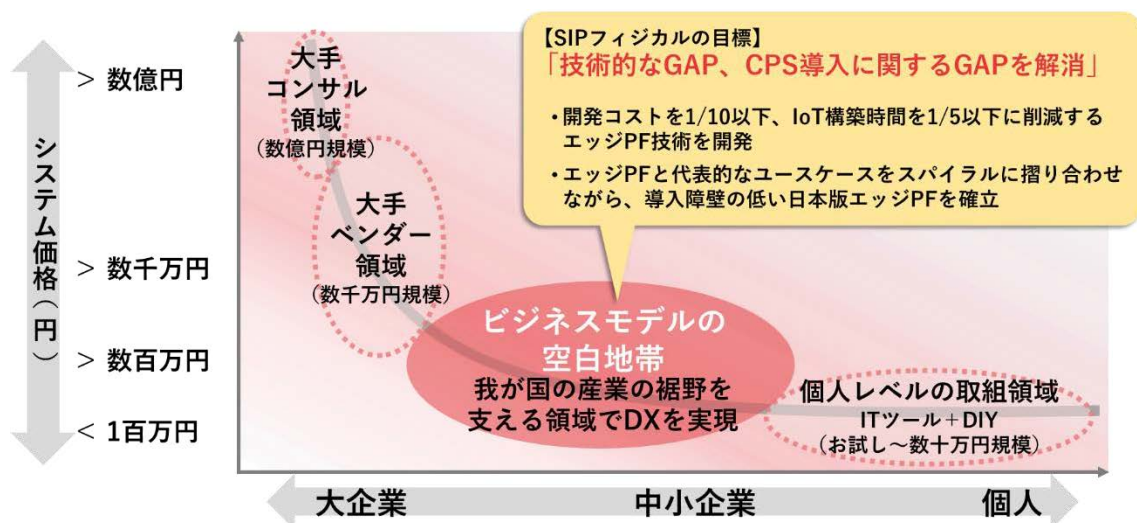
本課題では、Society 5.0の実現において重要な、あらゆる人がCPSソリューションを実現できる基盤技術（エッジPF）を中心にすえて、フィジカル空間の効率的なデジタル化の為に超低消費電力IoTデバイスやセンサを開発した。また、併せてこれらの技術の有効性・有用性を生産分野等で実証する開発を行うとともに、複数の実用化例を創出し、社会実装の目途をつけた。

世界に先駆けて、労働人口減少社会における生産性向上実現の成功モデルをビジネスモデルの空白地帯で構築・実用化し、裾野を広げていくことでSociety 5.0の実現に貢献する（図表3-2）。

本課題達成により実現したHyper Connected Worldでは、あらゆる人と人と、人とモノ、モノとモノが繋がり、地域や年齢、性別などを問わず、あらゆる個人が活躍でき、快適で豊かに暮らせる社会の原動力となる。



図表 3-1. Society 5.0 実現のために解消すべき GAP



図表 3-2. SIP フィジカルのターゲット、目標

②社会実装を実現するためのマネジメント体制が構築されていたか。

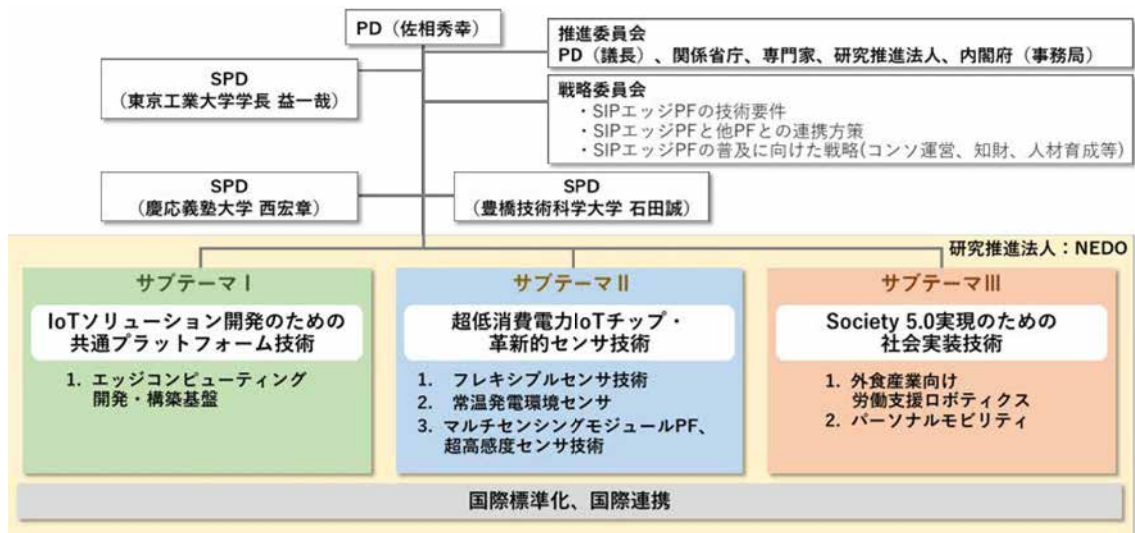
本事業体制を示す（図表 3-3）。

それぞれの研究テーマに対して、本課題の目標の共有化及びテーマの進捗管理並びにテーマ間連携などを着実に行えるよう、事業マネジメント会議を定期的で開催して、PD 及びサブ PD は効果的なマネジメントを実行した。サブ PD は PD と密に連絡を取り合うことで、各テーマのより実践的なマネジメントを行った。また、国際標準化と国際連携はプラットフォームの社会実装における重要テーマであり、共通的な活動として推進した。

構築するエッジ PF の出口戦略は、戦略委員会の協力のもと、具体的な戦略案を策定する。戦略委員会は社会実装にあたって要素技術構成の検討を行い、不足機能を明確化した。これに基づいて事業推進過程で追加機能に関する調整、追加事業の統合・提案、事業公募の施策等、本事業の成果の普及促進に対して過不足のない施策を PD へ提案した。

PD は、サブ PD とともに、戦略委員会の協力のもとマネジメントを実施し、フィジカル空間デジタルデータ処理基盤の構築を進めた。

また、研究テーマごとに社会実装を確実に達成するための社会実装責任者を選任し、PD とともに確実な社会実装への取り組みを推進している。さらに、事業期間終了後も本事業の成果を着実に社会実装していくための受皿として、エッジプラットフォーム（新 EPFC）を 2022 年 4 月に再出発させた。PD はサブ PD や戦略コーディネーター、事業者とともに新 EPFC に参加し、成果の社会実装に本事業終了後も関与していく。



図表 3-3. 研究開発体制

③研究テーマに対する評価、マネジメントが適切に実施されていたか。

研究テーマごとの進捗月報を作成し、適宜 Q&A を行って研究進捗の把握と必要な軌道修正等を行った。

また、最終年度にあたる 2022 年度には、PD 及びサブ PD が全事業者を訪問し、成果確認を行うと共に、成果の社会実装について方向性確認と具体的な進め方について議論を行った。

専門的観点からの技術評価（ピアレビュー）は、10 名以上の有識者を委員として招集し実施した。評価においては、研究開発の技術的な達成度と社会実装の取組み及び実現可能性について、研究テーマごとの取組み状況の確認に加え、課題全体としての取組み状況の確認を実施するとともに、今後の取組みに向けてアドバイスを受けた。

④民間から適切な負担を求めていたか。官民の役割分担が適切になされていたか。

課題開始当初より積極的な民間投資を求めてきた。具体的には例年のピアレビュー委員会において翌年度のマッチング額を提示するように依頼し、事業者から 50%以上の民間投資を確認した上で課題を推進した。

また、課題外の企業や団体に成果の試用にしてもらうことを事業者に求め、完成度を高めるための取組みを推進した。

⑤マッチング額が十分に計上されていたか。

50%以上のマッチング率である。

⑥府省連携が不可欠な分野横断的な取り組みとして実施されていたか。

産学官連携や府省連携、SIP の他の課題との連携、さらには SIP フィジカル課題の中でのテーマ間連携まで、徹底した連携強化を進めるよう日々事業者に依頼し、総務省、国土交通省、警察庁、経済産業省、厚生労働省、他との連携を推進した。推進計画や進捗状況については、日々の進捗管理の他、ピアレビューの場でも説明の要件として提示し、ピアレビュー委員のレビューを受けた。

⑦S I P 第 2 期で実施する他の課題との連携が適切に図られていたか。

2020 年 6 月に加速提案を承認いただいた SIP サイバー（ヒューマン・インタラクション基盤技術）との連携を推進し、ヒューマンインタラクションモデルを構築した。2021 年 6 月に追加配分を承認いただいた SIP サイバー（分野間データ連携基盤技術）との連携を推進し、運行データ（位置情報や車内の混雑度など）を CADDE でオープンデータ化した。単なるオープンデータ化にとどまらず、観光データと組み合わせることで利用者向けの Web アプリケーションを開発した。

また、SIP セキュリティと SRF 無線プラットフォームの連携を推進し、セキュア暗号ユニット(SCU)の適用について検討した。

以上