

2018年度-2020年度 産学連携ロボット研究開発支援事業 成果報告書



公立大学法人会津大学



目次

1	はじめに	岩瀬	1
2	会津大学のロボット研究と産学連携	成瀬	2
3	産学連携プロジェクト報告		
3.1	アイザックの取組み	馬場	4
3.2	東日本計算センターの取組み	鈴木	8
3.3	FSK の取組み	荒川	14
3.4	日本アドシスの取組み	増子	19
3.5	福島コンピューターシステムの取組み	永井	26
3.6	アクアクルーの取組み	佐藤	30
3.7	会津ラボの取組み	遠藤	34
3.8	ネットワンシステムズの取組み	山崎	37
3.9	TIS の取組み	松井	42
4	産学連携研究報告		
4.1	複数移動ロボットによる搬送サービスの参照モデルの設計	成瀬	52
4.2	クラウドロボティクスにおけるロボットデータレポジトリとデータ収集フレームワーク	渡部	56
4.3	3D Share! -自律ロボットを用いた 3D 計測とクラウドによる地図配布システム-	矢口	61
4.4	災害対応ロボット開発およびロボット人材育成	中村	65
4.5	災害地域への適用を目指した 3 次元地図生成と地図利用のためのロボットクラウドの開発	山田	70
4.6	3次元シーンの取得における動的視差法と Lidar 法との比較について	岡、畠	76
4.7	RT ミドルウェア用 IoT 通信モジュール群の提供と IoT システム構築における IoT 通信モジュール採用指針の検討	吉野	80
4.8	Cloud-Robotics (CR) Research: Survey for CR Architecture, Architecture for Multicloud Heterogeneous-Robotics, and Stochasticity-aware CR Workflow Scheduling	Akila	84
4.9	ロボットセキュリティの考え方と課題	中村	90
5	会津大学とロボット技術		
5.1	日本のロボット技術と会津大学のロボット研究	安藤	94
5.2	ロボットシミュレーター-Choreonoid と会津大学のロボット研究	中岡	97
6	会津大学産学連携ロボット研究開発支援事業	屋代	100

【付録】 プロジェクトメンバーリスト

1章 はじめに

会津大学 岩瀬 次郎

会津大学の産学連携ロボット研究開発支援事業は、浜通りの復興を目指すイノベーションコースト構想の一環として、会津大学がロボット関連企業等と連携し、2015年から開始された。ステージ I (2015-2017) の「ロボットソフトウェアの標準化」と「産学連携体制の構築」を受け、今期のステージ II (2018-2020) では、「ロボットにおけるデータの活用」と「産学連携体制の拡充」を推進した。



県内企業との連携のもとロボット SW ライブラリーを基盤としたロボット開発、ロボット同士のデータ共有技術開発、ロボットデータリポジトリ構築を行った。先端 ICT 研究による付加価値として、操作機能の高度化、制御、自律化、画像認識、ネットワーク技術等の有効性を実証し、さらにロボットデータリポジトリを構築し、ロボット同士のデータ共有からロボット相互の連携、複合体としてのロボット群を実現するクラウドロボティクスを実証した。

産学連携の中核として、会津ロボットデュアルウェア研究会は 15 社、約 200 人の技術者が参加し学生の参加も約 100 人に及んだ。ライブラリーSW 部品も 144 個を蓄積した。2018 ワールドロボットサミット (WRS) は Pre 大会 Simulation 部門での優勝を果たした。南相馬ロボットテストフィールド (RTF) に教職員が常駐した大学初の学外拠点「会津大学 RTF 研究センター」を開所した。「Dual-ware」(ハードとソフト) を理解したロボット技術者、デュアルウェア人材育成を行い (12 回、約 170 人参加)、2018 年度からは復興知事業に採択され高校などへの講習会の実施を通して浜通り人材育成に貢献した (31 回、約 350 人参加)。

当 6 年間の実績と強固な産学官連携体制をもとに、今後も会津大学の持つ AI、データ解析、シミュレーションなど先端 ICT をロボットに活用していく。With/After コロナ時代を睨みサイバーフィジカル (CPS)、サイバーセキュリティにも注力していく。本格化するイノベーションコースト構想のロボット領域において、RTF も活用し、先端 ICT×ロボットにより、ふくしまブランドの高付加価値ロボットの開発を推進する。

2章 会津大学のロボット研究と産学連携

会津大学 成瀬 継太郎

概要：本稿では会津大学において産学連携の体制で行われているロボットに関する研究開発事例を紹介する。我々はロボットの情報システムの開発過程に注目し、ロボットのデータとシミュレータの活用により高機能なロボットシステムの実現を目指している。

1. はじめに

ロボットの機能は、作業空間を認識するセンシングと、状況を判断しロボットの具体的な動作を決定する動作計画、実際に作業空間での動作を実行するアクチュエーションから構成される (Fig. 1)。古典的なロボットはあらかじめ定められた動作を繰り返すもので、機構と制御の開発が主であった。しかし、ロボットに要求される機能が高度になるにつれ、認識や動作計画といった計算機内部で行われる処理の重要性が高まっている。

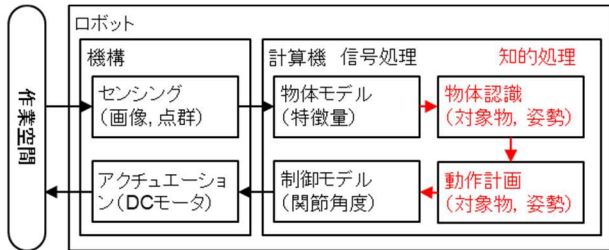


Fig. 1. ロボットにおける知的処理.

また、最近では複数のロボットと環境センサでシステムを構成することが可能になっている。これにより単体のロボットでは実現できなかった機能が可能になるが、ロボットシステムは複数の計算機からなる分散システムとなり、その開発が複雑になっている。さらに人工知能や機械学習、さらにシミュレータの活用によるシステムの機能の向上も期待されている。

会津大学はコンピュータ理工学を専門とする大学であり、我々はロボット技術に対して情報システムの面から貢献する研究開発を行っている。本稿では我々の狙いと、いくつかの事例を紹介する。

2. ロボットデータレポジトリを活用したロボットシステム開発

システムの開発において重要なことは品質の向上、コストの低減、開発期間の短縮化である。しかし、ロボットシステムにおいてはテストのコストが非常に大きい。実際にロボットを動かしてテストをする場合、長い作業時間があっても安全管理に時間がかかり、実際のテストに使われるのは数分の一程度になってしまう。さらに開発員に加えて安全管理用の人員も必要となる。結果として、ロボットソフトウェアのためのテストケースの数が少なくなり、ソフトウェアの品質はなかなか向上しない。

この課題に対して、我々はロボットのデータを積極的に活用することによる解決を目指しており、その根幹部分をロボットデータレポジトリ (Robot Data Repository: RDR) と呼ぶ新しい概念によるデータベースにより実現している。RDRはシステムに含まれているすべてのロボットとセンサからのデータを集約するものであり、認識系のソフトウェア開発ではそれをデータセットとして活用する。さらに地図のように新しく生成された知識も RDR に保存することで、これをシステムで用いられる知識のレポジトリにしている。RDRを導入したロボットシステムの模式図を Fig. 2 に、そして RDR の構造を Fig. 3 に示す。

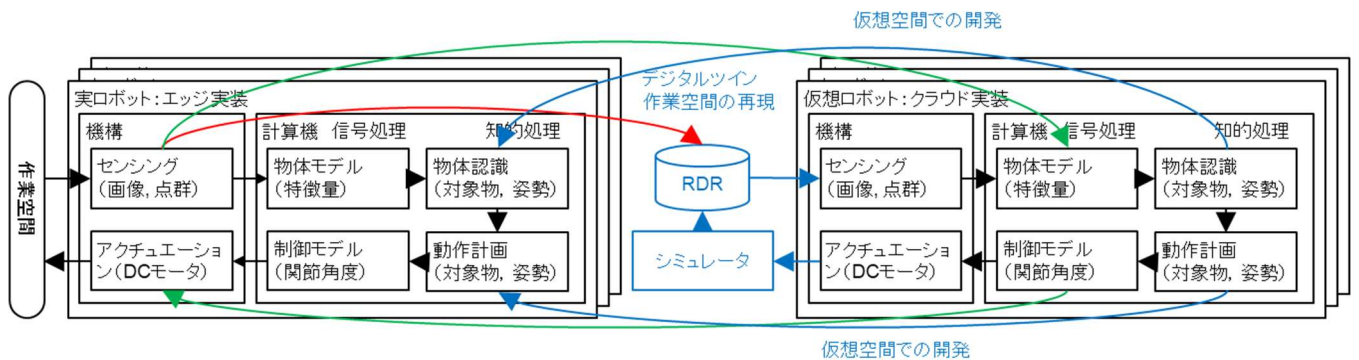


Fig. 2. ロボットデータレポジトリによるデジタルツインの実現とクラウドロボティクス.

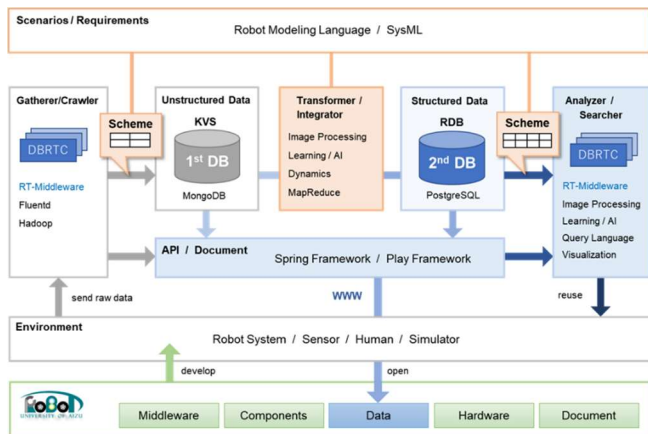


Fig. 3. RDR の内部構造.

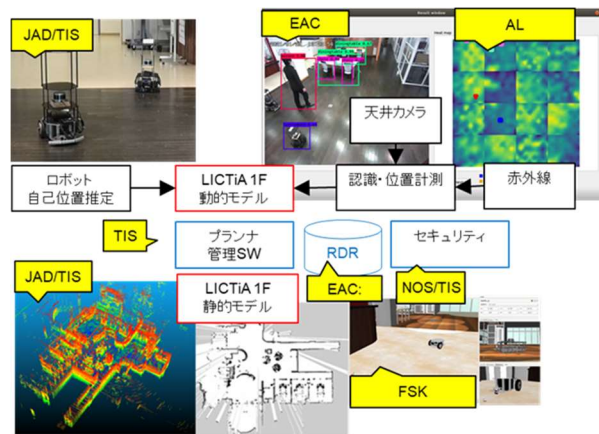


Fig. 4. 会津大学 LICiA での実験事例.

〈2・1〉 RDR の機能とシミュレータの活用

RDR は多様なセンサのデータとそこから生成される知識を保存するため (Fig. 2 の赤色で表示されるフロー), 各センサの測定原理に自然な形式で保存できることが重要である. そのため Fig. 3 に示すように RDR では一次データベースとして文書形式でデータを保存する. さらにデータの数値が意味するものを表現するためにメタデータも保存する.

さらに知識の生成は二次データベースで行われる. 例えば点群データから地図生成を生成するとき, 各時刻の点群データを入力するが, それを二次データベース内の表形式のデータとして表現する. そして, SLAM アルゴリズムにより新しく生成された知識である点群地図を三次データベースに保存する.

一方, ロボットの動作の検証に関してはシミュレータを活用する. ロボットに対する指令を実ロボットではなくシミュレータ内のロボットに送信することで, 仮想空間内でロボットの位置と速度を求めることができる. これは実際のロボットの挙動に似ているが, 完全に一致する訳ではない. しかし, 両者の運動を RDR に保存し, その差分を解析することで, シミュレータ内のロボットの動作をより実環境に近くなるように更新することが可能である.

この枠組みにより現実空間のモデル化が可能になり, これをソフトウェアテスト環境として使うことができる. 例えば, シミュレータで表現する仮想環境の初期条件や境界条件を, 現実世界で起こる外乱より大きく設定することで, 極端な条件でのソフトウェアのテストが可能になり, 高品質なソフトウェアが実現できる (Fig. 2 の青線のフロー).

〈2・2〉 エッジとクラウドから構成される分散ロボットシステム

本システムは本質的にエッジ (ロボット) 側とクラウド (RDR) 側の通信を含む分散システムになっている. そのため通信の実時間性が保証されれば, ソフトウェアの実装はエッジかクラウドのどちらか側にあっても問題はない. これを利用したクラウド側でのソフトウェア実装を Fig. 2 の緑色の線で示す. この実装で課題になるのは, 各処理のアーキテクチャとデータモデル, 通信形式, および通信セキュリティである.

3. 産学連携による研究開発

前節の RDR を中心としたクラウドロボティクスの実現にむけて, 我々は産学連携で研究開発を行っている. 大学は主に新しい処理方式の開発, データやアーキテクチャの標準化を行い, 企業側はシステム実装と実証試験を行っている.

さらに我々は会津大学先端 ICT ラボでサービスロボットの実験を行っている. Fig. 4 に我々の実証実験の事例を示す. 本年度までに移動ロボットの自己位置推定と制御, 建物センサによる物体認識と位置推定, 経路計画と運行管理, 分散ロボットシステムのセキュリティ, シミュレータによる動作検証などを行っている. これらの事例の詳細は本報告書のこの後の部分で説明されている.

この事例の他にも, 災害対応ロボットやプラント点検ロボットの研究開発, および福島ロボットテストフィールドを活用したロボットの試験も行っている.

4. おわりに

本稿では会津大学で研究開発を行っているロボット情報システムの構想と, 産学連携による取り組みの概略を紹介した.

最後に将来展望に触れたい. ロボットの研究開発のゴールは社会サービスとして実現し, 我々の生活を豊かにすることである. そのためには, 大学による学術研究, 産学連携による実用化研究, 企業による社会実装という 3 つのフェーズが必要である. 現在のロボット分野では, 実証試験が行われている事例が多いが, これは実用化研究で解決すべき課題が多いからだと思われる. 我々は今後も産学連携によりこの部分を推進し, 社会貢献を続けていく.

3章 産学連携プロジェクト報告

3.1. アイザックの取組み

—小型電動災害対応ロボットの開発—

株式会社アイザック
総務部担当課長（企画・営業） 馬場法孝

概要：弊社では平成 26 年より、災害対応ロボットの開発を行ってきた。災害対応ロボット開発の場面で、しばしば議論されるのが、いかにして事業につなげていくかという点である。災害対応を目的としてしまうと、いつどのような規模で起こるかわからない災害に対して、常にロボットの可動性を保つためのメンテナンスを実施しながら、技術の進歩を追いかける必要があり、これはリソースの観点から事実上不可能である。そこで、有事には災害対応ロボットとして稼働することができるロボットが、日常的に広く社会において活動する為には、何が必要であるかを考えることは極めて重要である。

1. まえがき

弊社が災害対応ロボットの開発を開始したのは平成 26 年のことであった。翌年の平成 27 年に、会津大学と連携協定を締結し、今日まで福島県のロボット産業の振興に寄与すべく、産学連携による研究開発を行ってきた。

これまでの事業を振り返りつつ、その中で生まれた要素技術をどのように事業化してきたかについて説明する。終わりに、今後の福島県におけるロボット産業振興とビジネスとしてのロボットを考えた際に重要となる視点を述べて、本稿をまとめる。

2. STAGE I 概要

平成 26 年度に弊社で自社開発したクローラ型ロボットは、マイコンにより直接モーターを動かすものであり、システムとしての脆弱性や、メカ機構の非成熟により、極めて不安定なロボットであった。ロボットと言うよりはかろうじて無線で動する大型のラジコンといったほうがわかりやすいだろう。それでも、その開発には県内企業 3 社とアドバイザーに日本原子力研究開発機構、そして会津大学も加わり、クローラロボット「スパイダー」が産声を上げた（図 1）。



図 1

翌年平成 27 年に会津大学とロボット開発に関する連携協定を締結し、まずは、システムとしてのロボットを目指し、ソフトウェアの標準化を開始した。ミドルウェアに OpenRTM-aist を導入し、それまで開発からメンテナンスに至るまで、一人の技術者に依存していた状況を脱し、社内外問わず共同開発が可能となった。

翌年平成 28 年には、開発を加速させ、他社開発の要素技術を積極的に導入した。ロボットアームを搭載し（図 2）、シミュレーター上でロボットの動作を同期させ、オペレーションを補助するコレオノイドモデル（図 3）の開発も実施した。



図 2

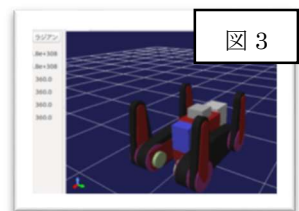


図 3

STAGE I の最終年度では他の要素技術だけでなく、他のロボットとの協調動作や、個々のロボットが得意とするタスクを分業して行う仕組みを構築し、大型ロボットと協力してタスクをこなす取り組みも行った（図 4）。また、ロボットの自律化に向けた補助機能の開発を行った。

3. STAGE II 研究開発成果

〈3・1〉平成 30 年度

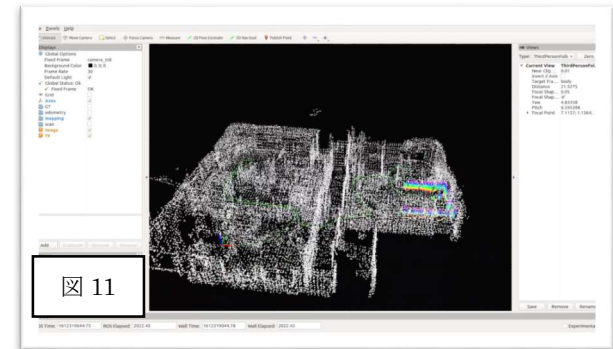
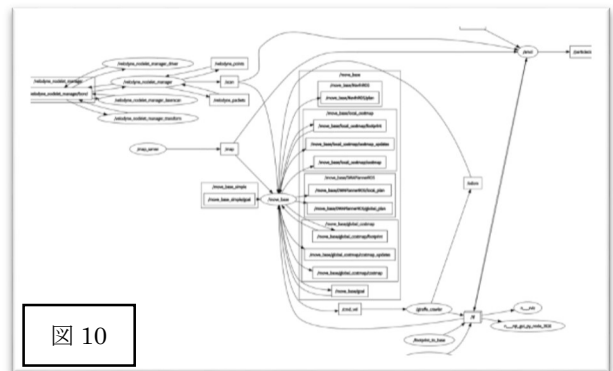
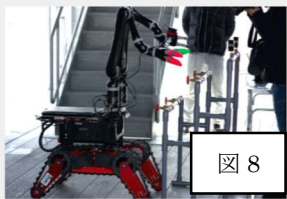
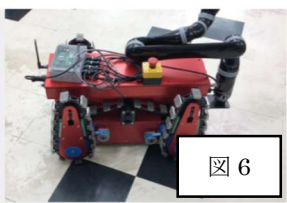
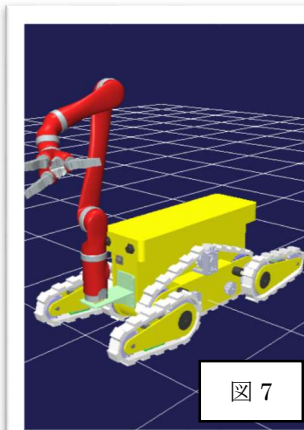
STAGE I では、要素技術の追加や、センサの追加の際に大きな機械的な変更を行わず、不整地走行に必要な要素を最適化すべく、様々な要素技術を実装し試験を繰り返した結果、不整地走行のための最適なハードウェアの構成の外観が見えてきた（図 5）。



構成を絞り込むための最終的な評価の場として WRS2018 にも参画し、これまでに蓄積したハードウェアの知見をすべて盛り込む形で、ロボットの機械的な設計を一新した。GPS 環境下で動作する大型ロボットに対し、非 GPS 環境下での遠隔操作を容易にする為、RGBD カメラを用いた遠隔操作を実現した。

〈3・2〉平成 31 (令和元) 年度

前年度実施したハードウェアの設計の見直しから、新しい機体 (SPIDER2020 図 6) が完成し、旧 SPIDER からのソフトウェアの移植を行った。台車制御用ソフトウェア、カメラ及び各種センサ類の周辺機器に関するソフトウェアを移植し、ロボットアームのソフトウェアについても移植した。機体開発に合わせて、コレオノイドモデルの開発も行った (図 7)。新機体の開発中に IMU センサを用いた、機体の姿勢情報を取得するソフトウェアを旧 SPIDER にて開発した (図 8)。



〈3・3〉令和 2 年度

WRS2020 に向けた、機体の改良を実施した。上位制御系を追加し、制御用 PC、無線ルーター、非常停止ボタン、制御用 PC 電源、ロボットアーム電源を追加した (図 9)。

4. 事業化について

〈4・1〉ハードウェアの変遷と導入実績

初代 SPIDER から共同研究を通して開発されたモデルを図 13 に示す。



初期の SPIDER でのハードウェア的な知見をもとに標準ベース車両として Giraffe を製品化し販売を開始した。研究開発機関やロボット開発ベンチャー、そして原発廃炉の第一線に配備するための、ベースとして採用された。Giraffe をベースとして、会津大学と共同研究により開発してきたソフトウェアを移植させた SPIDER2020 を開発。スパイダー2020 をベースに、より厳しい環境での動作を目的とした Camel を開発した。

今後 Camel をベースに、警備・点検ロボットや除雪・除草ロボットへと開発を進めていく。

〈4・2〉成果物の応用範囲

STAGEII 各年度の要素技術の成果と、ユースケースを表 1 に示す。

	平成30年度	平成31年度	令和2年度	～令和4年度	～令和6年度
ベース車両	SPIDER ・制御用PC強化 ・連続走行距離延長 ・メンテナンス性向上 ・ロボットアーム	SPIDER2020 ・防水 ・軽量化 ・制御用PC最適化	SPIDER2020改良 ・上位PC ・非常停止ボタン ・ロボットアーム ・無線ルーター	・制御用PC強化 ・感度化 ・最大連続8時間稼働 ・ロボットアーム強化	・サブローラ駆動オプション強化
センサ	距離画像センサ(RGBD)	IMU	LIDAR	LIDAR IMU	LIDAR IMU RGBD
ソフトウェア	RTM制御 コレオノイドモデル同期	既存開発ソフトウェアの移植	ROS制御 SLAM 未知環境での自律走行	ROS制御 SLAM精度向上 人の居ない環境下での自律走行(平地) 簡易昇降補助	ROS制御 SLAM精度向上 複雑な環境下での階段自律昇降 自律での障害物回避・越障
イメージ					
ユースケース	研究開発用ベース車両	共同研究開発用ベース車両	廃炉ロボット	床下点検ロボット 警備ロボット	除雪ロボット 除草ロボット

表 1

平成 30 年度の 8 時間連続稼働や、平成 31 年度の防水、RTM 制御とコレオノイドモデルが評価され、廃炉用ロボットとして採用された。また、現在 ROS 化や LIDAR の搭載、SLAM の実装が評価され、警備点検ロボットの事業化が始まりつつある。

今後、サブローラ部のオプションの強化や、自律制御系の技術の集積により、除雪・除草ロボットへとつなげていく。

5. 終わりに

〈5・1〉ロボット産業振興

ロボット開発に最適な場所はどこか。と問われれば、一切の迷いなくそれは福島県であると答える。あらゆるリソースが福島県に集まってきており、それを凄まじいスピードで行政が後押ししている。これほどまでロボット開発において、恵まれた環境は世界中探しても見当たらないだろう。

そんな中更にこの取組を加速させる為に、何が重要かを述べておきたい。最大のポイントは、参画者の増加である。これだけ恵まれた環境であれば、自然と県外からロボット開発を行おうとする企業が入り込んでくることは想像に難くない。しかし、最も重要なのは、県外企業が何をやるかではなく、県内企業がどれほどこのロボット産業に関わっているかである。ロボット事業という言葉だけを聞くと、参入障壁の高い事業のように思えるが実際のところそうではない。現時点ではロボットという言葉の定義すら明確には定まっていない。サービスロボットの市場についても、今まで様々な議論がなされているが、サービスロボットの市場は個々の要素技術の組み合わせによるものであると考えている。その上で、個々の要素技術の適応範囲を広げる取り組みが、サービスロボットの市場を形成していると考えられる。

つまり、あらゆる業種・業態にとって、ロボット事業は自身の事業の適応範囲を広げることで成り立つ。これはつまり、ロボットと言うキーワードを使って、自社の持つ要素技術や強みに関してより多くのユーザーを獲得しようとする取り組みであり、新規事業の設立ではなく、既存事業の拡大であると言える。ロボット産業に自社がどこまで関わるかの線引きをしっかりと、ロボットという言葉の存分に活用する組織が増えることが、今後のロボット産業振興には不可欠と言えよう。

〈5・2〉ビジネスとしてのロボット

当然のことながら弊社は営利団体であり、研究開発の成果は、市場に投入し収益を上げることで初めてその評価が下される。ビジネスとしてロボットを考えた際に、いかに優れた要素技術でも、利用する人がいなければそこに価値は存在しない。あらゆる要素技術に価値を与えるためには、前述のように様々な業種・業態の企業が積極的に関わる必要がある。加えて、参画企業が事業化を成功させるためには、自社がどこまで関わるかという線引きが重要となる。

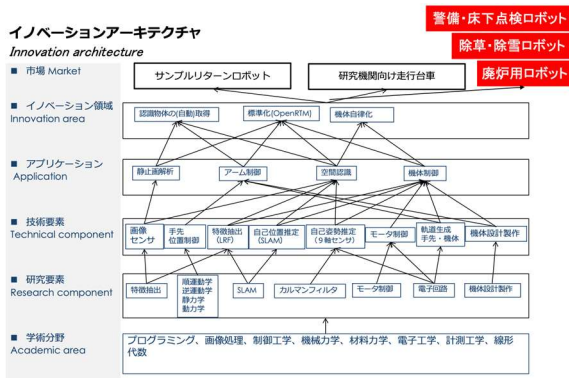
弊社は不整地走行ロボットのベース車両という領域にフォーカスし、リソースを集中させた。我々の製品単体ではただ遠隔操作で不整地を走る電動台車でしかないが、この要素技術を持つことで、例えば自律走行のソフトウェア開発の技術を持つ企業とつながることで、警備ロボットや配送ロボットというものになる。ここに除雪・除草機構の要素技術を持つ企業とつながると除雪・除草ロボットができあがる。

このようにして要素技術をもつ企業同士が有機的につながるだけで、まるでブロックを組み上げる様にロボットは出来上がっていく。大切なことは、ロボット開発のすべてを自社でやろうとしないことである。

SFの世界でよく描かれるように優秀な科学者を地下の研究施設に閉じ込めて秘密裏にロボット開発をしたところで、地上でオープンに異業種を巻き込んで開発を行う組織には到底及ばないだろう。このことは、過去の歴史が証明してきた。

ロボットという人類の夢に向かってその巨大なブロックの美しい一片であろうとすることが、ロボットの事業化の成否には重要な要素である。そのような視点で本事業の6年間を振り返ったとき、いかに意義のある取り組みであるかがわかってくることだろう。

〈5・3〉イノベーションアーキテクチャ図



〈5・4〉会社紹介

社名：株式会社アイザック

本社：福島県会津若松市東栄町 1-77

スマートシティ AiCT 2 F

WEB：www.aizuk.jp/

Mail：info@aizuk.jp

設立：平成 24 年 8 月

資本金：330 百万円

代表取締役会長：南嘉輝

代表取締役社長：三好眞夫

従業員数：10 名

株主構成

一般財団法人温知会

パラマウントベッド株式会社

東邦ホールディングス株式会社

株式会社あさひ調剤

株式会社ビー・エム・エル

株式会社アインファーマシーズ

株式会社テムザック

有限会社会津エンジニアリング

株式会社みずほ銀行

3.2. 東日本計算センターの取組み

—RDR、画像・動画検索、物体認識—

株式会社東日本計算センター 鈴木 教文 丹内 智博 菊地浩之 中野 修三

概要：当社は会津大学と「産学連携ロボット技術開発支援事業」の Stage I に引き続き「産学連携ロボット研究開発支援事業」Stage II (以下、本事業) に参画した。その事業の中で会津大学と共にクラウドロボティクスによる「異種複数ロボットのデータの利活用」というテーマを設定して研究・開発を行い、主に Robot Data Repository (RDR) についての研究開発を担った。当社のロボットソフト研究開発はロボットの制御を得意としており、更にそれを活かすためロボットのデータの利活用にこれから取り組んでいきたいと思案していたところ、今回この事業の経験で得られた技術が「ロボット×ICT 事業化」における一助になると考える。

1. まえがき

当社は「産学連携ロボット技術開発支援事業」の Stage I に参画した際「D1-Proj: ドローン」「I1-Proj: 知的画像処理」「N-Proj: ネットワーク」「R2-Proj: RTC-IF 共通化」の担当でロボットミドルウェア OpenRTM-aist を用いたロボットソフトの研究開発に携わった。その Stage I に参画できたことで、福島イノベーション・コースト構想に基づく地域復興実用化開発等促進事業費補助金(以下、実用化補助金)を活用して当社独自の研究開発/実証を行った結果、案件の打診を受けることが増えた。それにより、企業連携によるロボットソフト開発が活発化し会津大学との Stage I の取組みは、当社のロボット事業の礎となった。

そして、また本事業へも参画させていただき、クラウドロボティクスによる「異種複数ロボットのデータの利活用」というテーマで RDR の研究開発を担った。これにより、ロボットビジネスの事業化を行う上で有益なロボットのデータ利活用の技術を得ることができた。よって、これまでの成果と今後の事業展開について報告する。

2. 東日本計算センターについて

株式会社東日本計算センターは、福島県いわき市に本社があり、東京統括事業所/横浜事業所/日立事業所/会津オフィス/ながとイノベーションセンターに拠点がある。

1965(昭和 40)年の設立から受託計算業務、センター業務から出発し、システムエンジニアサービス、ソリューションサービス、システムインテグレーションサービス、セキュリティコンサルティング、お客様のコアビジネス周辺のビジネスプロセスアウトソーシング業務と徐々に事業内容を拡大し、創業 55 年を越え、お客様、地域に貢献してきた。

半歩先の技術を研究、実証するために、R&D センターを設置し、この部門を中心とし、各事業部が連携して、ロボット事業に取り組んでいる。

●企業理念

ICT サービスを通じ

『社会とともに』『お客様とともに』『社員とともに』
発展していくことを目指す。

●企業ビジョン

経営・ソフトウェア・サービス・研究開発のすべてにおいて、顧客の期待を大きく超える品質を提供する。

3. 本プロジェクトで習得した技術と成果

〈3・1〉RDR

異種複数ロボットのデータを会津大学先端 ICT ラボ (LICTiA) 内のクラウド環境上に配置された共有の DB に蓄積し、ロボットエンジニアが必要とするデータを抽出、そして用途に応じた変換・加工(補間)を行い、更にその整理されたデータを利用し 3 次元点群地図などの知識化されたデータを生成して多段 DB の構築を行った。また、その整理されたデータや知識化されたデータの両方を利用して、ロボットの自律移動で活用できる 2 次元格子地図の生成や(株)コレオノイドのロボットシミュレータ Choreonoid(コレオノイド)にインポート可能なボクセル化した地図を生成、そして 3 次元点群地図と RGB の画像をフュージョンした地図も LICTiA クラウド環境上で生成を行った。

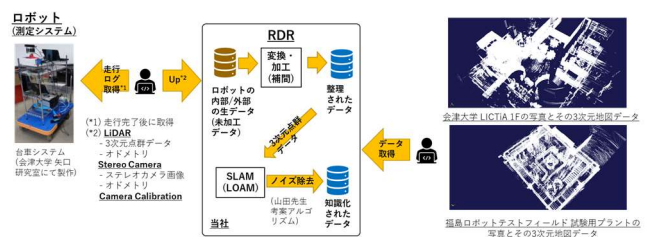


Fig.1 多段 DB の概要図

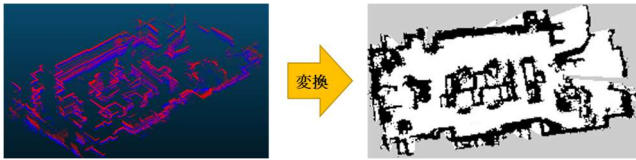


Fig.2 3次元点群地図から2次元格子地図に変換

次に、異種複数ロボットのデータを蓄積し整理する上でロボットのデータは「同じタイミングで全てのデータが揃って吐き出される」ものではなく、異種のロボットに関してモーターや搭載されるセンサ、精度などが異なった場合、全てを同質のものとして扱うことができない。

そのため、今回の研究開発で行った多段 DB の構築についてロボットからのログデータは、まずオブジェクト（物体）として定義するタイプの DB（Object Oriented DB: OODB）に蓄積することを考え、効率的にデータを蓄積した。そして蓄積したデータを整理し表形式で記述する一般的なデータベース（Relational DB: RDB）に変換・加工（補間）を行い、意図したデータの整理が実現できた。

これらの技術はロボットの情報を蓄積・整理する上で基礎となる考え方であり、様々な用途のロボットシステムへの活用が想定される。

よって、今後の当社ロボットビジネス事業化、ロボットシステムへの一助になると考える。

また、RDR の主な取り組みを以下に紹介する。

<RDR：2018 年度の取り組み>

「ロボット動作再生のための多段 DB システム」

実ロボットが採取したデータを仮想空間上(Choreonoid)のロボットモデルに送信することで振る舞いを再現する。

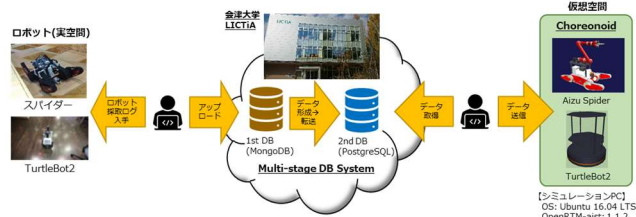


Fig.3 ロボット動作再生のための多段 DB システム概要図

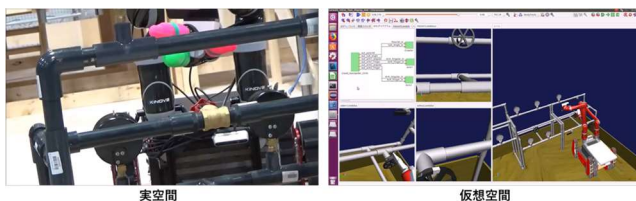


Fig.4 Choreonoid 上でロボット動作を再現

<RDR：2019 年度の取り組み>

「ロボットデータ蓄積と利活用のための多段 DB システム」
ロボットに取り付けた LiDAR(測距センサー)やステレオカメラが捉えたデータを基に作成した 3 次元地図を DB から取得して利用する。

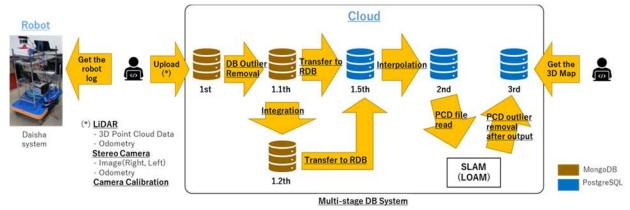


Fig.5 ロボットデータ蓄積と利活用のための多段 DB システム概要図

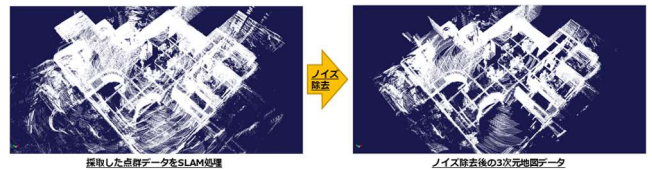


Fig.6 LiDAR 点群データを SLAM 処理、ノイズを除去した 3 次元地図

<RDR：2020 年度の取り組み>

2020 年度の取り組みとして、(i)「人・物体の監視」は(株)会津ラボと連携、(ii)「動力制御盤の遠隔監視」についてはアクアクルー(株)と連携して RDR を活用した。

(i)「人・物体の監視」サーモユニットから定期的にアップロードされたサーモセンサーデータを使用して RDR 上でヒートマップを生成した。また、物体認識システムにより処理された物体認識結果(画像)とヒートマップを RDR からダウンロードし、ビューアにそれぞれ表示を行い“人”と“物体”を識別することができた。

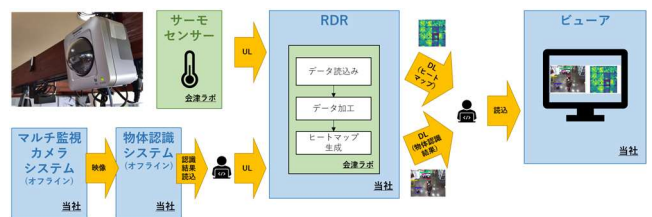


Fig.7 人・物体の監視 概要図

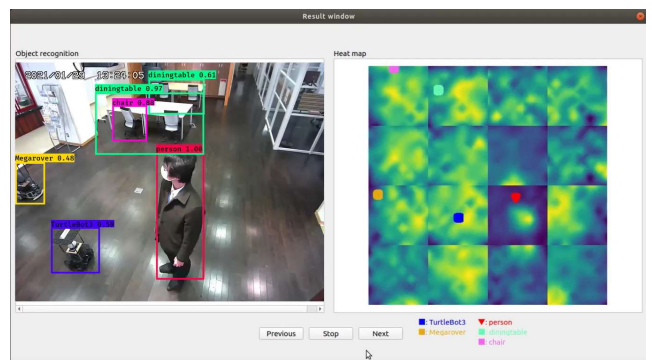


Fig.8 物体認識結果とヒートマップのビューア

(ii)「動力制御盤の遠隔監視」ランプ認識システムより定期的にアップロードされた動力制御盤ランプ情報を RDR から取得し、遠隔監視システム画面に表示して遠隔での監視を行った。

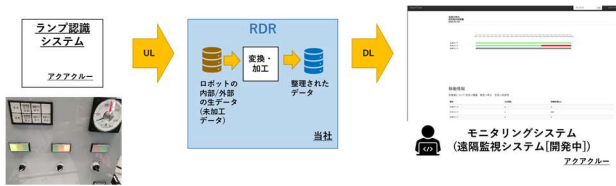


Fig.9 動力制御盤の遠隔監視 概要図

〈3.2〉 画像・動画検索

ロボット開発の現場ではロボットを多く撮影するが、後日撮影された映像を探す時や見直す際、特定のロボットの映像を探し出すことに時間が掛かる場合がある。

これらの改善を図るため、LICTiA クラウド環境上に配置されたDBに映像データやそれに関連する付随データを蓄積し、そのデータが利用できる環境を構築した。

2018 年度には画像特徴量を使った物体の類似検索システム「ロボット動作解析のための映像認識・検索システム」を実装。また、2019 年度には動画の撮影日時情報などのメタ情報を用いた動画検索システム「ロボット動作解析のための動画検索システム」も実装した。

その他にもこれらのシステムは、ロボットの内部ログなどと突き合わせてロボットが正しく動いたのか、ロボットに実装したプログラムにバグがないかをテストする目的でも利用が想定できる。

本システムはロボット本体の制御とは異なるが、ロボットの研究開発を行う際には欠かせない技術のため、更なる技術の習得を図っていききたい。

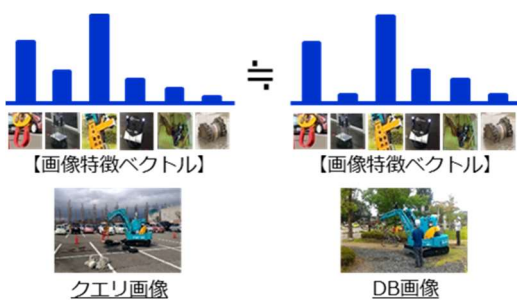


Fig.10 画像特徴ベクトルによるマッチング

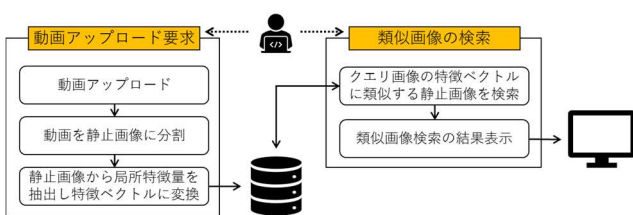


Fig.11 ロボット動作解析のための映像認識・検索システム概要図

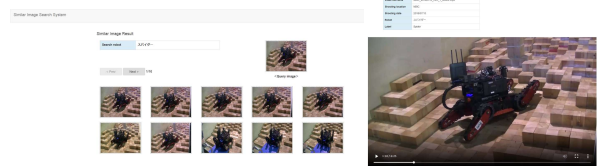


Fig.12 類似画像検索結果画面および、動画再生画面

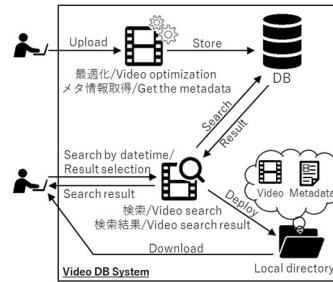


Fig.13 ロボット動作解析のための映像認識・検索システム概要図

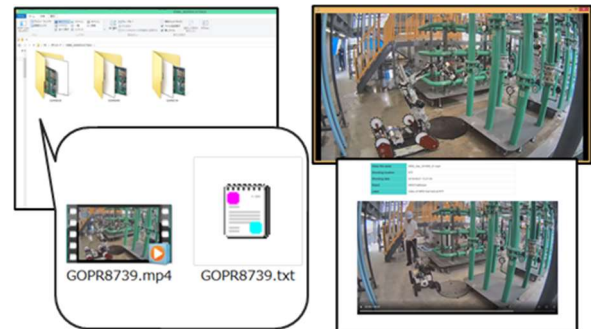


Fig.14 2019年度のシステムで取得した動画とメタ情報

〈3.3〉 物体認識

ロボットの自律移動において、事前に経路を計画しロボットを移動させているが、移動経路における想定外の障害がある場合に経路を再計画し移動させる必要がある。その経路を計画する際には、ロボットの位置情報や障害物の位置情報が必要になるため、その情報を外部環境のカメラから計測しロボットへ提供する。

本システムは、LICTiA 1F に監視カメラを設置してそれらの映像をローカル PC に転送し、物体認識を実施した上で認識対象の位置(物体座標)を計測する。

当社でも物体認識の研究開発は複数のプロジェクトが行っており、それぞれ異なった物体認識のアルゴリズムを用いている。今回、会津大学との研究開発では一般的な「keras-yolo3」のアルゴリズムを用いて物体認識を行った。このアルゴリズムは既に YOLOv4 および、YOLOv5 が発表されており、これらの研究や技術は日々進歩し、成長が著しい。よって、当社としても日々進歩する技術への追従が必要と考える。

次に、監視カメラで捉えた物体の座標を求める際には画像座標(u,v)とワールド座標における3次元座標(X,Y,Z)を関係づけた以下の較正式で求めることができる。そして、これらの情報を RDR へ蓄積した。

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K * P * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

* s : スケーリングファクター, K : カメラ内部パラメータ行列, P : カメラ外部パラメータ行列

本システムもロボット本体の制御とは異なるが、ロボットの自律移動など様々なロボット研究開発分野で欠かせない技術のため、更なる技術の習得を図っていききたい。

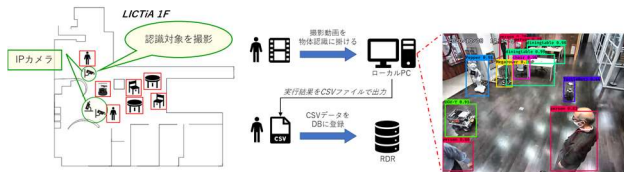


Fig.15 システム概要図



Fig.16 カメラの映像から物体認識を実施した結果

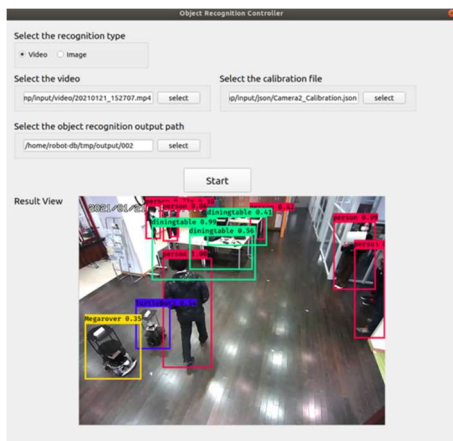


Fig.17 物体認識システム GUI

4. 技術面以外の成果

本事業ではプロジェクトに参加している複数の企業と連携する機会があった。

月1回開催している「会津ロボットデュアルウェア研究会」は各企業の取り組みを知る機会でもあり、その会の中で複数の企業から新たに「サーモセンサー」や「動力制御盤ランプ」データを RDR へ蓄積する提案を受け、当社のプロジェクト

である RDR の研究開発で連携する機会が得られた。よって、より密に企業間で連携した研究開発ができた。

今後もロボット事業化に向けてこの実績を活かし様々な企業と連携していきたいと考える。

5. 今後の事業展開

会津大学ロボット事業の Stage I をきっかけとして始まった当社のロボット事業は、Stage II の RDR、ドローン隊列飛行制御システム、廃炉に向けた水中ロボット等の取り組みに広がっている。当初 6 名だった開発メンバが現在では 11 案件 19 名の体制に拡大している。

ドローン事業の展開は、当社の特徴である隊列飛行を活かして災害対応/防災分野、広域点検、環境調査などの分野で実際に複数の案件開発に繋がっている。

また、水中ロボットはタンク点検へ活用する案件への打診もありこれらとおして廃炉分野へ関わっていききたい。

これまでロボットの制御を主としてきたが、Stage II で取り組んだ RDR により、これからはロボットから得た様々な情報を扱うロボットシステムの開発ができる企業を目指す。

今後は、これらの案件の継続と拡大を図り、当社の中で一つの事業となる様に展開していききたい。

当社のロボット開発は、いわき市三和町の廃校を活用した「ながとイノベーションセンター」を研究開発拠点としている。更に「ながとイノベーションセンター」は、ロボット開発だけではなく地域に開かれた ICT の拠点として地域に貢献していくことを考えている。

6. 最後に

本事業をとおして、会津大学との産学連携がより深まってきた。

本事業の最終年度は、今まで経験の無い未知の感染症が流行し、慣れない勤務形態の中での研究開発となり様々な面で大変な年であったがこの困難を乗り越えてロボットソフトの研究開発、そしてロボットビジネスの事業化へ更に邁進していききたい。

この会津大学ならびに本事業に関わった各企業とのご縁を活かして、福島県浜通りの発展のため福島イノベーション・コースト構想に貢献していききたいと考えている。

文 献

1. <https://rtc-fukushima.jp/5th-robot-symposium-aizu/5th-robot-symposium-aizu-00/>

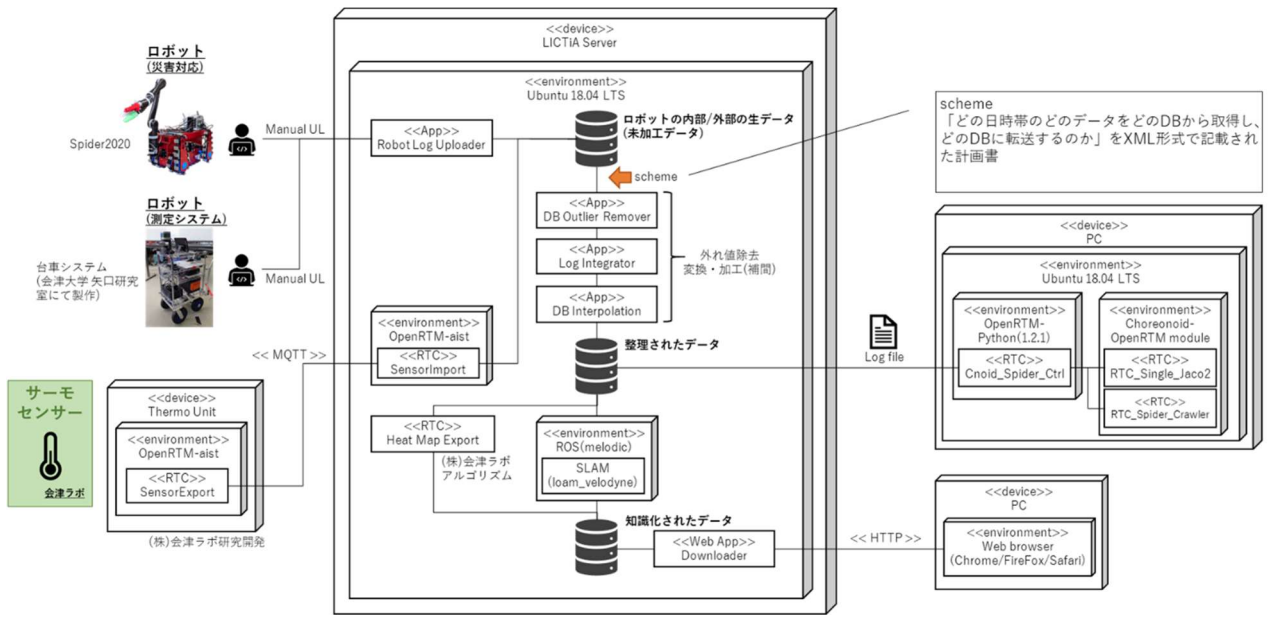


Fig.18 RDR システム構成図「付録」

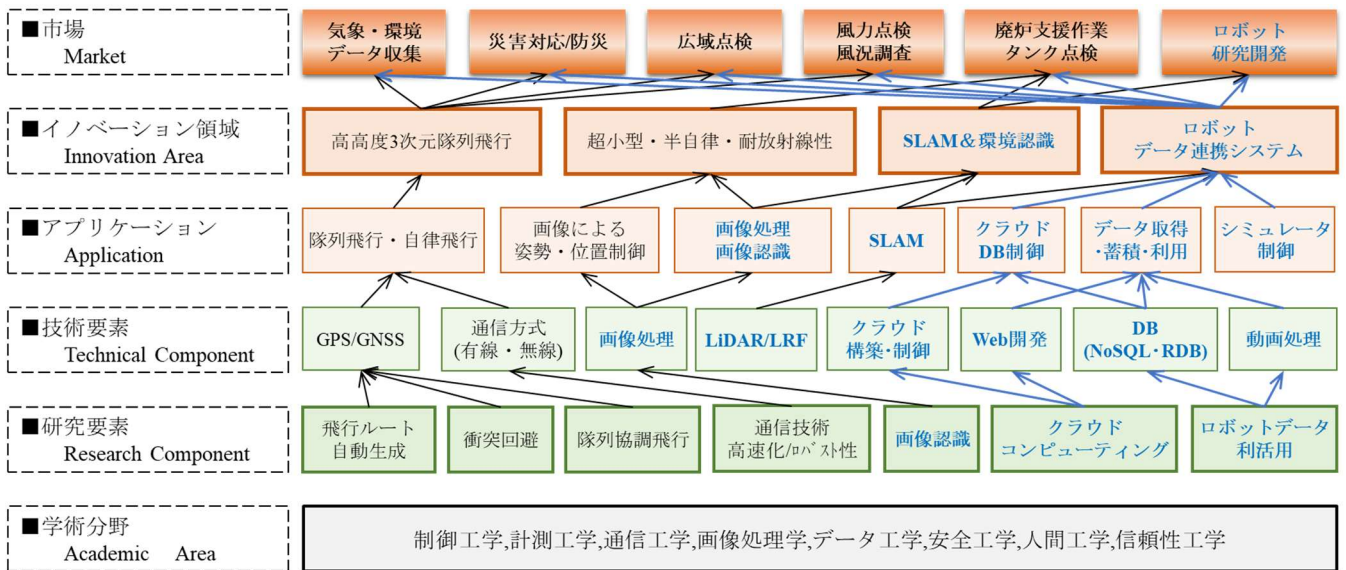


Fig.19 イノベーションアーキテクチャ図

添付.1: 株式会社東日本計算センターのご紹介



●会社概要

株式会社 東日本計算センター	
EAC(East Japan Accounting Center Co.,Ltd.)	
代表者	代表取締役社長 鷲 弘樹
設立	1965(昭和40)年11月6日
URL	https://www.eac-inc.co.jp
本社	
〒970-8026 福島県いわき市平字研町2	
東京統括事業所	
〒160-0022 東京都新宿区新宿3-1-1世界堂ビル8F	
横浜事業所	
〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央4-36-17	
日立事業所	
〒319-1221 茨城県日立市大みか町1-8-8第2ミナミビル2F	
会津オフィス	
〒965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀会津大学先端ICTラボ プロジェクトルーム8	
ながとイノベーションセンター	
〒970-1261 福島県いわき市三和町渡戸字弓張木95	

●沿革

1965年 11月	福島県平市大町20番地に、株式会社東日本計算センター (EAC) 設立
1966年 1月	日本ユニバック株式会社 (現日本ユニシス株式会社) より電子計算機を購入・設置 地方自治体、金融機関、民間企業等の業務受託を開始
1966年 11月	14市町村合併により、福島県いわき市平字大町20番地に地名変更
1973年 4月	東京都文京区本郷一丁目に東京支店を開設
1978年 8月	東京都新宿区新宿五丁目の伊勢丹第2別館に東京支店を移転
1982年 2月	福島県いわき市平字研町2番地に、本社社屋を新築
1982年 4月	同敷地内に新館を増築し、社内全部門の移転完了
1982年 12月	株式会社東日本システムエンジニアリング (ESE) を設立 仙台通商産業局 (現東北経済産業局) 第1号情報処理サービス業電子計算機システム安全対策実施事業所に認定
1983年 3月	株式会社東日本ソフトウェアビジネス (ESB) を設立
1988年 4月	株式会社アルパインソフトウェア (ASI) を設立
1988年 9月	東京都台東区下谷に上野統合事業所を開設
1993年 1月	東京都新宿区西落合二丁目の伊勢丹落合センターに東京支店を移転
1996年 2月	神奈川県横浜市鶴見区鶴見市場に横浜事業所を開設
1998年 6月	東京都新宿区新宿二丁目に東京支店を移転
2001年 1月	新宿区新宿三丁目に上野統合事業所を移転し、東京統括事業所として開設
2001年 7月	東京統括事業所にて、データセンター業務を開始
2003年 11月	情報セキュリティマネジメントシステム (ISMS) の認証取得
2004年 12月	情報セキュリティマネジメントシステム (ISMS) の範囲拡大
2005年 10月	日本セキュリティ監査協会 (JASA) 入会
2005年 11月	情報セキュリティマネジメントシステム (BS7799) の認証取得
2006年 11月	創立40周年記念式典 新事業部制に移行
2007年 10月	情報セキュリティマネジメントシステム ISO/IEC27001の認証取得
2009年 3月	東京支店を、東京都新宿三丁目の東京統括事業所に統合
2011年 3月	東日本大震災発生、福島第一原子力発電所事故 BCP発動
2013年 4月	神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央四丁目に横浜事業所を移転
2014年 2月	プライバシーマークの認証取得
2015年 10月	50周年記念感謝の会開催
2016年 3月	品質マネジメントシステム ISO9001の認証取得
2017年 9月	茨城県日立市大みか町一丁目に日立事業所を移転
2017年 12月	福島民報社「ふくしま産業賞 特別賞」受賞
2017年 12月	経済産業省の『地域未来牽引企業』(全国2,148社)に選定
2019年 4月	いわき市三和町に「ながとイノベーションセンター」開設

3.3. FSK の取組み

ーロボット SW ライブラリ, ロボット教育, シミュレータよりー

株式会社 FSK 荒川 弘栄

概要：当プロジェクトにおいて、弊社はソフトウェアライブラリの構築・運用、ロボット教育、シミュレータについて取り組んだ。ソフトウェアライブラリを公開し RT ミドルウェアで作成したコンポーネントを初心者でも使いやすい形で提供しつつ、幅広くロボット関連の情報を提供する仕組みを作り上げた。ロボット教育では合計 4 回の講習会を開催した。シミュレータの取組みでは Choreonoid でモデルを構築した。これらの経験により、ロボット講習会の開催ノウハウ、ロボット技術を習得し、総合的なシステム全般を扱う企業として事業展開する。

1. まえがき

弊社は創立以来 58 年間、ソフトウェアの開発、運用保守を主軸に業務展開してきた。この度、縁があり会津大学と連携させていただき、本プロジェクトに参画することによりロボット関連事業に進出することが出来た。

当プロジェクトにおいて、弊社はステージ I より、RTC ライブラリの構築・運用とロボット教育を担当した。さらにステージ II より、シミュレータについても取り組んだ。その概要は次のようになる。

- RTC ライブラリでは様々なツールで作成したコンポーネントが初心者でも使いやすいようにライブラリをさらに充実させた。
- ロボット教育では新たな講習会の開発に取り組み、ステージ II では合計 4 回の講習会を開催した。
- シミュレータでは、ロボットモデルや環境モデルを作成し、教育研修や WRS2018 で活用した。

弊社では、これらの取組みにより、ロボット技術の動向、知識などを幅広く習得することができ、ロボットや IoT に関する商談に活用するようになった。今後、習得したこれらの知識を基に、浜通り地方のロボット関連事業のリーディングカンパニーとしてさらに活動していきたい。

2. FSK について

弊社株式会社 F S K は福島県のいわき市に本社がある。昭和 38 年に常磐炭鉱(株) (現常磐興産株式会社) の電子計算部門が分離し(株)福島総合計算センターとして設立され、平成 16 年 12 月、商号を現在の株式会社 F S K とし、現在に至っている。

システム構築からシステム運用支援、システム保守、業務支援まで、トータルでサービスを提供しており、主に地方自治体の税業務受託処理サービス、住民情報システム、財務会

計システム、介護保険システムの開発・導入やアウトソーシング事業等の業務を行っている。そして、民間企業向けにもリゾートホテル向けシステム、生産管理システム、財務会計システム、運行管理システム等の開発・導入・運用保守管理を行っており、幅広い業務に精通している。

また、ISO9001、情報セキュリティマネジメントシステム適合性評価制度 ISO/IEC 27001、プライバシーマーク使用許諾事業者の認証資格を取得しており、品質、セキュリティにおいても信頼していただける会社であると自負している。

3. 実績

今回のプロジェクトで弊社は「RTC ライブラリの構築」「教育研修」「シミュレータ」について取り組んだ。「RTC ライブラリの構築」と「教育研修」はステージ I から引き続き、「シミュレータ」についてはステージ II からの取組みである。

RTC ライブラリはステージ I では RTC (ロボット・テクノロジー・コンポーネント:RT ミドルウェアで作られたコンポーネント) に特化したライブラリサイトを構築した。ロボットソフトウェアにさほど詳しくなくても、登録・検索が簡単にでき、また、フォーラム機能やドキュメントを掲載する機能などを付け、より分かりやすく、簡単に理解できるような工夫もした。

ステージ II においては、RT ミドルウェアだけではなく ROS や他のツールで作成されたものでも登録しやすくしている。昨今は GitHub でソース管理を行うことも多く、プログラマーが GitHub で管理している場合を想定した機能も追加している。また、併せて ROS やシミュレータの情報提供も行えるよう、サイトのカテゴリ構成を変更している。これらの変更は刻々と変化するロボットソフトウェアへの対応と、RT コンポーネント以外でもプログラム資産の再利用を促進することを考慮して行われた。

また、このサイトだけで RT ミドルウェアや RT コンポーネントを学習し動作させることができるよう、簡単な e-ラーニングも掲載しているが、利用者がより情報を得やすいように最新のバージョンで動作するよう更改し、バージョンアップを行っている。

教育研修では、新たな講習会の開発を行い4回の講習会を実施した。ステージⅠと合わせて計12回、延べ167人が受講している。ステージⅠではソフトウェアを主とした内容としていたが、ステージⅡではデュアルウェア（ハードウェア・ソフトウェアの両方を意味する造語）を対象とし、ハードウェア・ソフトウェアの両方の知識を習得することによる、さらなる効率的な開発を目指した講習会を行った。また、今後ロボットシミュレータを用いた開発が増えることを見据え、ロボットシミュレータ「Choreonoid」に関する講習会も開催した。このChoreonoid講習会はすべてを1台のパソコンのソフトウェア上で動作させることができるため、Web会議システムを利用した遠隔での講習会も開催した。研修室などで集合教育が行えないコロナ禍の対策として、今後は遠隔での講習会が多くなる傾向であり、開催手法など有用な経験を積むことができた。

尚、これら RTC ライブラリ、e-ラーニング、講習会の資料は全て「RTC-Library-FUKUSHIMA」(<https://rtc-fukushima.jp/>)に保存してあるため、振り返り学習などにも役に立つもので、セルフラーニングの教材として活用できるようにしてある。

表 1：開催した講習会

開催日	開催内容	開催場所	受講者数
2016/3/4	RTミドルウェア講習会（初級）	会津大学	20
2016/11/18	RTミドルウェア講習会（初級）	会津大学	18
2016/12/16	RTミドルウェア講習会（初級）	いわき明星大学	17
2017/1/27	RTミドルウェア講習会（初級）	日本大学工学部	16
2017/3/10	RTミドルウェア講習会（中級）	会津大学	20
2017/8/25	RTミドルウェア講習会（初級）	南相馬市	16
2017/9/29	RTミドルウェア講習会（中級）	日本大学工学部	20
2017/12/14, 15	RTミドルウェア講習会（上級）	会津大学	16
2019/1/18	デュアルウェア講習会	会津大学	8
2020/3/3	デュアルウェア講習会II	会津大学	5
2020/3/9	Choreonoid講習会	会津大学	3
2021/2/19	Choreonoid講習会（Zoom）	Zoom	8

シミュレータの取り組みでは、Choreonoidを利用し、ロボットモデル、環境モデルを作成し、WRS2018や教育研修で活用した。LICTiAモデルでは、実証実験のデータを受け取り、シミュレータ上でロボットの動きを再現した。作成したモデル、活用のされ方については表2：作成したモデルを参照されたい。

表 2：作成したモデル

名称	概要
EV3簡易モデル	OpenRTM-aistを使用した制御コントローラを開発。EV3のシミュレータと実機を動作検証する環境を構築した
WRS2018 STMコースモデル	実機とChoreonoidを連動させた環境を構築し、WRS2018大会でのSTM実機部門での遠隔操作の補助機能として活用された。
TurtleBot2と自律走行コースモデル	TurtleBot2モデルと遠隔操作からライトレースまでの制御コントローラを開発したことで、Choreonoidでのセンサ情報の取得方法や自律走行の学習教材となった。
EV3とコースモデル	EV3モデルとレンジセンサ、カセンサ、カラーセンサを使用した制御コントローラを開発し、実機がない場合でもRTミドルウェア（中級）でのロボットの制御方法をChoreonoidを使用して学習できる。
LICTiAの1～2Fモデル	LICTiAの1～2Fモデルを開発し、Choreonoidで実証実験の検証などを行える。また、LICTiAでの実証実験などで生成した地図データとの比較対象などに用いることができる。

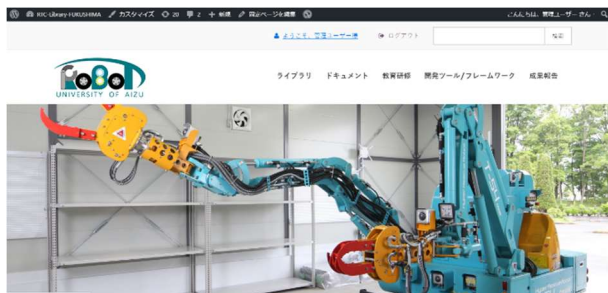


図 1：RTC-Library-FUKUSHIMA



図 2：デュアルウェア講習会 1日目

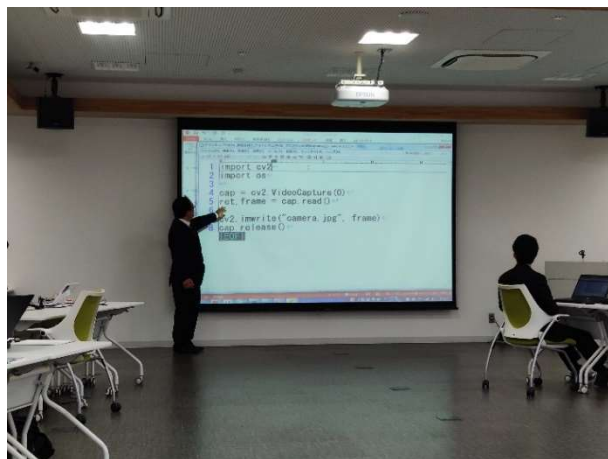


図 3：デュアルウェア講習会 2日目

4. 習得した技術・知識

当プロジェクトでの取り組みで以下のことについて習得した。

① 技術的なノウハウ

- ・ RT ミドルウェアで作成されたコンポーネントの構造
- ・ RT ミドルウェアを使ったコンポーネント作成
- ・ RT ミドルウェアを使ったロボットシステムの構築
- ・ シミュレータ (Choreonoid) でのモデル作成, RT ミドルウェアでの動作
- ・ 実在する環境モデルやロボットモデルの作成・活用
- ・ シミュレータでのテスト・開発

② 業務プロセス的なノウハウ

- ・ ロボット関連サイトの構築ノウハウ
- ・ 教育研修用教材の選定・作成方法
- ・ ロボット講習会開催の設計業務
- ・ ロボット講習会開催の事務業務
- ・ e-ラーニング教材作成方法
- ・ シミュレータを使ったロボット開発プロセス



図 4 : Choreonoid LICTiA モデル

5. プロジェクト支援について

弊社ではプロジェクト支援作業も行っている。ロボット技術だけでなく、ロボットに関わるプロジェクトの支援を行うことにより、ロボット技術以外の必須作業・準備作業などを

経験することができた。また、月一回開催している「会津ロボットデュアルウェア研究会 (ARDuC)」の会議の議事録の作成なども担い、参加企業の行っている取り組みなど、全体を詳細に把握することもできた。

WRS2018 出場時には、行動予定をまとめたり、準備物や必要物品の洗い出し、リスト化、チェックなどを行ったりした。大きな混乱もなく、出場者の負担を少なくできたと思っている。WRS の競技結果は「災害対応標準性能評価チャレンジ」では予選敗退 (予選敗退チームでは最上位)、「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」では優勝であった。

6. 本事業の成果物

ソフトウェアライブラリは会津大学先端 ICT ラボ (LICTiA) のクラウドに構築した運用環境に適宜機能を追加し、それを成果物としている。尚、運用にあたってはネットワーク監視装置なども導入しながら安全で安定した環境を提供し、これまでに障害で停止することもなく稼働している。

教育研修では講習会向けテキスト・説明用スライド・e-ラーニングを作成し RTC-Library-FUKUSHIMA で公開した内容と、それらを作成するための検討資料などを成果物とした。

シミュレータでは、作成したモデルを成果物としている。

7. 事業展開

弊社ではロボット事業を展開するにあたり、現在すでに確立されている自治体関係の営業チャンネルを生かしていきたい。自治体では介護や教育、災害対応、受付自動化などのロボット関連の需要が増えることが予想され、このプロジェクトで習得した技術やノウハウ、企業間交流を駆使し、提案、受注することができると考えている。

具体的には、弊社ですでにスキルのあるシステム構築や運用保守業務を担いながら、今回の事業で得たロボット関連の業務支援を行うといった、分野を問わない総合的な形態の業務を提案することができる。

弊社ではこれらの機会を生かし、浜通り地方のロボット関連事業をリードしていきたい。

今後の事業展開における具体的なキーワードは次のようになる。

① 顧客

- ・ 自治体
- ・ 民間企業
- ・ 学校 (高校・大学)

② 業務

- ・ 教育・研修
- ・ 運用・保守

③ 技術・プロセス・ノウハウ

- ・ システム開発・構築
- ・ ロボットソフトウェアライブラリ構築

- ・ RT ミドルウェアでロボットシステム開発
- ・ RT コンポーネント作成
- ・ ROS との連携
- ・ ロボットシミュレータ
- ・ Choreonoid
- ・ センサ活用

弊社ではこれらのキーワードを基に各種業務システム、ロボット、センサを使ったシステムなど、使用機器やシステムを問わない総合的なシステム全般を扱う企業として事業展開する。

8. 今後数年の重点展開

今後数年については図5 イノベーションアーキテクチャ図に示すように県内教育機関や企業に向け、講習・研修・講師派遣、教材コンテンツ開発に重点を置いて展開していく。また、習得した技術要素を基とした技術者派遣などでさらなる技術力向上、展開を図っていききたいと考えている。

講習会の開催については、技術やノウハウ面での課題は少ないが、どのようにして収益を確保するかが大きな課題となっている。かかる主な経費は講習内容の検討や設計、実装を含めた開催準備までの人件費、当日の人件費、教材・材料、教材コンテンツのバージョンアップ、会場、設営の費用などであるが、今回はプロジェクトの費用で担ったため講習会の参加者は無料で受講できた。

講習会の事業化にあたっては、自治体や学校など、開催者に費用を負担してもらう方法、受講者自身に費用を負担してもらう方法が考えられる。開催者に費用を負担してもらう方法については会津大学の他の事業（復興知支援事業など）での外部講習会で実現している。今後は他の教育機関（大学・高専・高校・専門学校）へも提案し、既存の教材を活用しながら積極展開していきたい。受講者自身に費用を負担してもらう方法については、今回のプロジェクトの講習会内容を踏襲しながら、講習会受講後の付加価値を付けることで有償化できるのではないかと考えている。受講後に持ち帰れる教材を使った講習会内容とし、講習会後の継続学習、応用学習ができるような仕組みを作っていくことで付加価値を付け、受講者にとって魅力的なものとする必要がある。

また、教育研修やシミュレータに取り組みながら、ロボットシステム開発の手法やプログラミングに関してのスキルアップも図れた。今後、これらのスキルを基に、ロボットを開発する企業への情報提供や技術者派遣も事業化できると考えている。

9. 最後に

この度、ステージIからプロジェクトに参画させていただき、技術面、交流面で多くの成果を得ることができた。当社内では当初2名でスタートしたこのプロジェクトが、現在では5名が関わるプロジェクトに成長しており、いわきの本社

内でもロボットソフトウェアの技術者が育っている。この経験を基に教材作成や講師派遣など、このプロジェクトを通しての事業展開をしており、今後も会津大学との太い絆を生かし、福島県の産業発展に寄与していく所存である。

冒頭の繰り返しになるが、今後はさらに技術習得に励み、浜通り地方のロボット関連事業のリーディングカンパニーとして活動していきたい。

付録 1：株式会社FSKの概要



株式会社FSK

所在地 福島県いわき市内郷御殿町 3-168

付録 2：株式会社FSKの沿革（抜粋）

	沿革（抜粋）
昭和38年	福島県いわき市に常磐炭鉱(株)の機械化に基づき電子計算部門を分離し(株)福島総合計算センターとして設立
昭和42年	地方自治体の税業務処理受託サービスを開始
昭和58年	いわき市内郷御殿町に新社屋を設立
昭和59年	電子計算機システム安全対策実施認定事業所認定を受ける
平成4年	地方自治体(町村向け)住民情報システムの稼働(以降、財務会計システム、図書館システム、他多数の自治体関連、民間関連システムを稼働させる)
平成13年	日本工業規格「JIS15001」準拠の「プライバシーマーク使用許諾事業者」として認定を受ける
平成15年	財団法人日本情報処理開発協会「ISMS適合性評価制度」認証取得
平成16年	財団法人日本品質保証機構「ISO9001(2000年版)」認証取得
平成16年	商号を株式会社FSKに変更
平成17年	福島県原町市に南相馬営業所を開設
平成25年	創立50周年を迎える
平成27年	会津大学 第一期プロジェクトに参画 ・現地常駐2名体制で参加開始
平成28年	LGWAN-ASP事業者に登録
平成30年	会津大学 ステージIIプロジェクトに参画 ・現地常駐を1名増員し、現地3名体制で参画

■詳細版：教育、要素ソフトウェア流通—ビジネスモデル

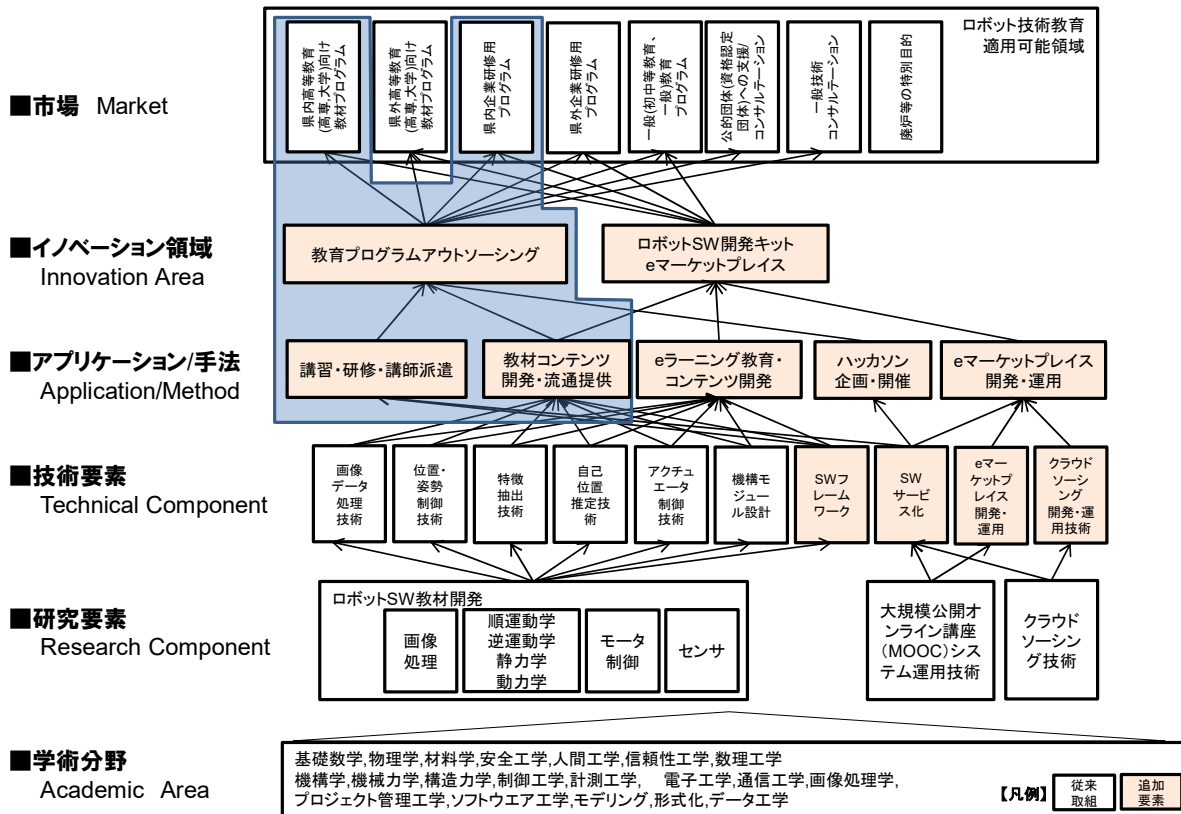


図 5 イノベーションアーキテクチャ図

3.4 日本アドシスの取組み

株式会社日本アドシス 増子 智昭 影山 博昭 馬場 良弘 熊田 誠也

概要：弊社では、平成 30 年より、災害対応ロボット用高速映像伝送ソフトウェア開発、ロボット動画データの利活用を目的としたマルチ動画同期プレビューソフトウェア開発、屋内有人環境下における複数ロボット走行を想定した自律搬送ロボットソフトウェアと環境状況に応じた経路計画ロボットソフトウェアの研究開発を行ってきた。本事業の成果について報告する。

1. まえがき

弊社は 1996 年（平成 8 年）に情報・制御システムのソフトウェア開発会社として創立し、これまで製造、小売、卸・物流、金融等の業務系アプリケーション及び、カーナビやオーディオ機器といった組込ソフトなど様々なソフトウェアの開発・運用保守を行ってきた。

福島県において、東日本大震災及び原子力災害からの復興に向け、新事業創出、産業集積化の取り組みが進む中、弊社も地場の企業として、新事業に挑戦し、地域の復興・発展に貢献したいと考えていた。

弊社は、制御・組込みソフトウェアの開発を行っており、それらの技術をロボット開発に生かせると考えていたが、ハードウェアを設計・開発する企業体ではないため、ロボット開発分野にどうアプローチすべきか腐心していたところ、縁あって会津大学の「産学連携ロボット研究開発支援事業」への参画のお声掛けを頂き、ロボット開発分野への進出の足掛りを掴むことができた。

本プロジェクトの中で、弊社は映像伝送や動画データの利活用、屋内自律移動ロボットなど多岐に渡るソフトウェアの研究開発を実施させて頂いた。これらの開発内容と成果について報告する。

2. 本プロジェクトで習得した技術と成果

(2・1) 災害対応ロボット用高速映像伝送ソフトウェア開発

(1) 開発の背景および目的

災害対応用ロボットは人が立ち入れない箇所での活動が期待されるため、操作は基本的にロボットから伝送される映像を元に遠隔で行われるが、映像伝送の遅延によりリアルタイムにロボットの状況が伝わらないことで操作ミスが発生することや、映像の解像度が低ければ周辺状況の把握が困難になり、操作しにくくなるといった課題がある。それらの課題解消を目的として、弊社にて開発を進めていた高速映像伝送ソフトウェアを、災害対応ロボット（Aizu Spider）用にカスタマイズし、導入した。

(2) ソフトウェアの概要

本ソフトウェアはデータのエンコード/デコード処理に NDI (Network Device Interface) を使用している。NDI は、NewTek 社によって開発された、TCP/IP ネットワークを介したライブ中継映像用のオープン標準規格であり、NewTek 独自のエンコーディング技術 (NDI コーデック) で、高品質・低遅延かつ高フレーム精度でリアルタイムなビデオ/オーディオ伝送を可能としている（弊社実測で伝送遅延は 30ms 程度。伝送画質とネットワーク帯域使用量の相関については Fig.1 参照）。OpenCV を使用することで一般的な Web カメラ (UVC 規格)、IP カメラの他、Intel 社の Depth カメラ (RealSense D435) 映像を容易に伝送することが可能である (Fig.2 参照)。

本ソフトウェアを導入した Aizu Spider は WRS2018 等、様々な競技会やデモに参加され、最大 6 基のカメラ映像を伝送し、Aizu Spider の遠隔操作に活用頂いた (Fig.3 参照)。

Example NDI video stream	Approximate bandwidth required
1 x UHDp60 video stream	250 Mbps
1 x UHDp30 video stream	200 Mbps
1 x 1080p60 video stream	125 Mbps
1 x 1080i60 video stream	100 Mbps
1 x 720p60 video stream	90 Mbps
1 x SD video stream	20 Mbps

Fig. 1. 伝送画質とネットワーク帯域使用量の相関

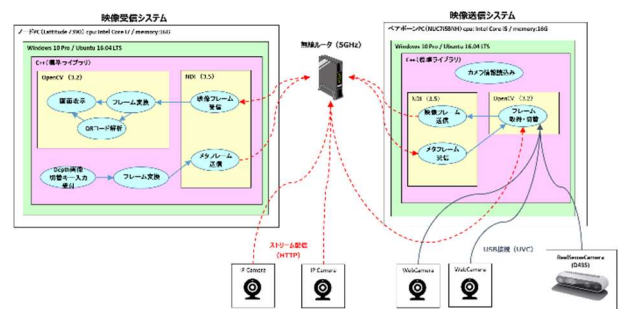


Fig. 2. ソフトウェア構成



Fig. 3. Aizu Spider のカメラ映像表示画面
(DepthCamera:6. Resolution:640×480. Frame rate:30fps)

〈2・2〉ロボット動画の利活用を目的としたマルチ動画同期プレビューソフトウェア開発

(1) 開発の背景および目的

ロボット開発の現場においては試走用のテストコースに、様々な角度でロボットの状態を確認できるよう、多数のカメラが多角的に配置されており、それらのカメラを使用して撮影した動画はロボットの動作分析に活用されているが、様々な角度の動画を任意の時刻で同期再生するような仕組みは高額な放送機材でなければ実現が困難であるため、一部の角度での映像を参照するに留まり、全ての動画が有効に活用されているとは言い難い状況である (Fig.4 参照)。

同時刻で撮影された様々な角度の動画を 1 画面にプレビュー再生することができれば、多角的な動作分析が可能となり、複数の動画を手動で開始時間を合わせて再生するような手間も省くことが可能であるため、マルチ動画同期プレビューソフトウェアを開発した。

(2) ソフトウェアの概要

本ソフトウェアは動画データベースシステムからローカルフォルダに取り出された複数の動画を、同期を取りながら同時に再生する機能を提供する。同期再生に必要な動画の開始時刻は、動画データベースシステムから合わせて取り出された動画情報ファイル (ffmpeg、MediaInfo 等の動画解析・編集ツールにて取得可能) から参照する (Fig.5 参照)。



Fig. 4. 撮影動画の利活用時の課題

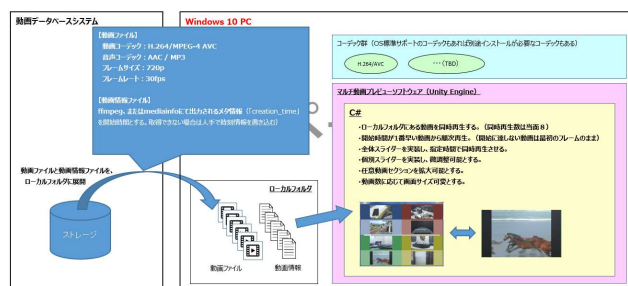
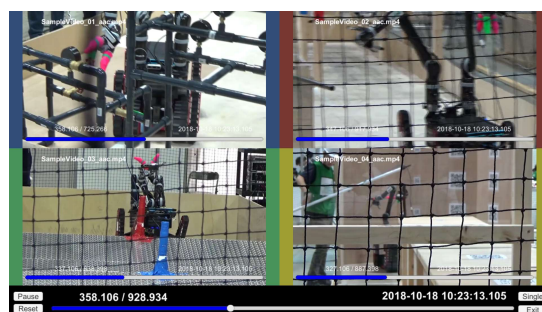


Fig. 5. ソフトウェア構成



(a) 通常画面



(b) 注視画面

Fig. 6. 動画再生画面 (4 ビデオソース)

統合/個別スライダーを配し、纏めて再生位置を変更することや、個別に再生位置を変更することができ、また注視したい映像を拡大して再生することも可能である (Fig.6 参照)。

今後、会津大学で研究が進められているロボットデータリポジトリに種々の競技会、実証実験等で取得されたデータが蓄積され、調査や分析、動作再現等に活用されていくため、本ソフトウェアもデータの効果的、効率的な利用に寄与できればと考える。

〈2・3〉屋内有人環境下における複数ロボット走行を想定した自律搬送ロボットソフトウェアの研究開発

(1) 開発の背景および目的

屋内を自律移動し、案内や搬送を行うサービスロボットシステムを構築する上で、自己位置推定しながら地図を作成する SLAM は必須の技術だが、ロボット (センサー) によって取得できる地図の精度にばらつきがあり、ガラスのようにセンサーに映らないものを考慮できないといった課題がある。これらの課題を解消し、簡単に SI と運用ができる自律移動

ロボットシステムの構築を目標とし、自律移動ロボットソフトウェアの研究開発を行った。

本研究開発は会津大学、TIS 株式会社、弊社の共同研究として行われ、TIS 株式会社は上位システムを担当し、弊社は主にロボット部分を担当した。

(2) 研究開発の概要

本研究開発では、階層化された地図の概念を導入した。LiDAR により取得された詳細な 3D 点群地図は自己位置推定用のエゴ地図として使用し、3D 点群地図を 2D 格子化したものを局所的な経路計画用の見取り図=ソシオ地図として使用する。ソシオ地図はロボット種別に依らず使用する事が可能な地図で、ロボットに見えない障害物を加えることで、それらを迂回する局所経路の探索が可能となる。また、上位側で大局的な経路計画を行うための、どの経由点を通して目的地へ至るべきかを示す有向グラフを大局経路地図として使用する (Fig.7 参照)。

ロボットは台車ロボットをベースとして LiDAR (Velodyne-VLP16) のみを搭載したシンプルな構成とし、自己位置を推定する情報として、車輪オドメトリと LiDAR オドメトリを使用する。SLAM ソフトウェアには LOAM (Lidar Odometry and Mapping in Real-time) を使用し、ナビゲーションソフトウェアは Navigation_Stack (amcl+move_base) をベースとしてカスタマイズを加えたソフトウェアを使用している (Table.1 参照)。

取得されたエゴ地図をナビゲーションロボットの自己位置推定ノードに連携し、経路計画用に加工されたソシオ地図をナビゲーションノードに連携する。配送システムなどの上位システムから大局経路地図に基づいて選択された経路指示を受け、ロボットが最適経路を選択して自律移動する (Fig.8 参照)。

【階層化された地図表現】

- ・エゴ地図 ... ロボットのセンサやSLAM技術に固有のセンサマップ。自己位置推定に使用
- ・ソシオ地図(コストマップ) ... ロボットが局所的な移動経路を計画するために用いるコストマップ。経路計画に使用
センシングできない物体などロボット自身が持ちえない情報(ガラス壁等)が含まれる
- ・大局経路地図 ... どの経由点を通して目的地へ至るべきかを示す有向グラフ
Way Pointの他、1台しか侵入できない狭い区間を単線区間として定義



Fig. 7. 階層化された地図構造

Table 1. 自律移動ロボットの仕様

Robot name	Megarover V2.0	Turtlebot3 waffle pi
Sensors	Velodyne VLP-16	
	Wheel Encoder	
Framework	ROS Kinetic Kame	
Slam Software	LOAM	
Localization Software	amcl [modified]	
Navigation Software	move_base [modified]	

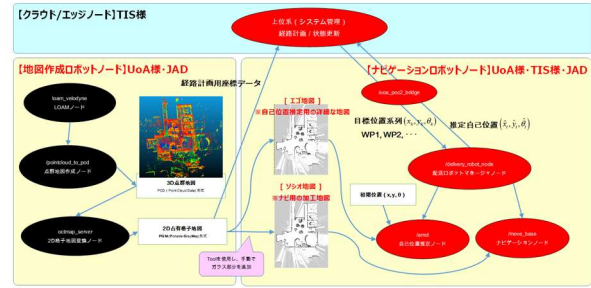


Fig. 8. ソフトウェアノード構成

(3) 実証実験

2019/11/25~11/29 に会津大学 先端 ICT ラボ (LICTiA) の 1 階フロアを使用し、実証実験を実施した。

LOAMにより取得した点群地図を 2D 占有格子地図変換したものをエゴ地図、エゴ地図に雑点除去やガラス追加など加工を施したものをソシオ地図 (Fig.9 参照)、ソシオ地図にアルファベットで示される Way Point と単線区間を定義したものを大局経路地図として使用し (Fig.10 参照)、上位側から Way Point 指示を受けて、ロボットを稼働させ、複数ロボットのナビゲーションを実施した。

想定通り、ロボットはガラス壁を迂回する経路を取り、静止物についてはある程度障害回避できたことから、階層化された地図の有効性は確認できたが、ロボット間の衝突・干渉や、複数 Way Point を経由することによりロボットの移動が直線的となり、また経由点に障害物が設置されるとロボットがスタックしてしまう (周辺に移動できるスペースがあるにも関わらず) といった課題が顕在化した。

これらの課題について、2020 年度の研究開発にて機能改善を図った。

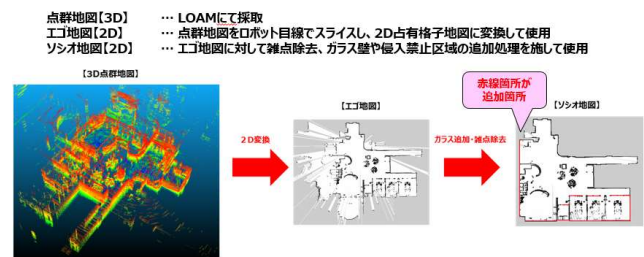


Fig.9. エゴ地図とソシオ地図

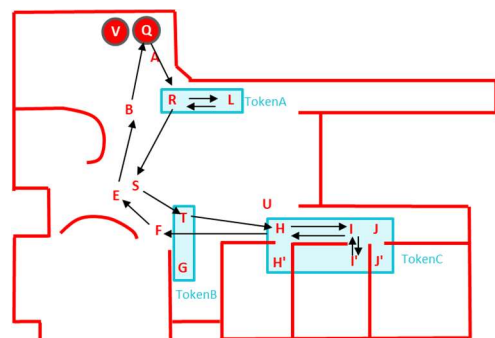


Fig. 10. 大局経路地図



Fig. 11. 実証実験の様子

〈2・4〉 環境状況に応じた経路計画ロボットソフトウェアの研究開発

(1) 研究開発の概要

2019 年度研究開発における実証実験にて顕在化した課題 (〈2・3〉 項(3)) の改善のため、以下の 2 つの機能改善を行った。

(a) 観測障害物の動的地図追加

観測した動的障害物情報をソシオ地図 (コストマップ) に反映する。ナビゲーション中に観測された動的障害物は静的地図 (ソシオ地図) 上に存在しないため、静的地図から生成された局所的経路と、障害回避機能による回避経路に矛盾が生じ、非効率な経路を取ることや、障害物を回避し切れず衝突することがあった。

本機能は、ROS-costmap_2d の Obstacle/Inflation layer 機能を拡張し、15m 範囲内の観測データを全てコストマップに反映する (Fig.12 参照)。本機能実装により、観測した障害物を反映した効率的な局所経路計画が可能となる。

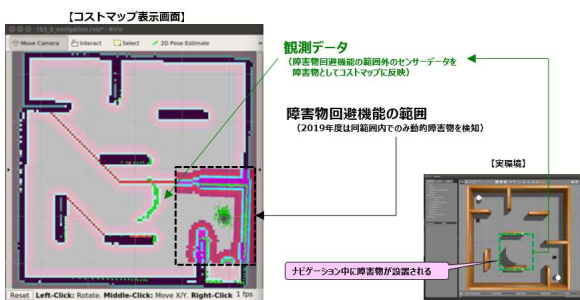


Fig.12. 観測障害物の動的地図追加

(b) ポテンシャル場を用いた局所経路探索

ノードとエッジから成るグラフから、他ロボットの移動経路を考慮して生成されたポテンシャル場をコストマップに表現し、通行エリアを制限する。複数ロボットの運行下において、大局経路地図上で、運行中のロボットの経路を除いたフィールドから通行可能なエリアを谷底とするポテンシャル場を生成し、ロボットに連携する。ロボットはポテンシャル場の情報をコストマップに反映し、ポテンシャル場の範囲内で局所的経路探索を行う。本機能実装により、ロボット間の衝突や単区間での待ち合わせを回避し、スムーズな移動が可能となる (Fig.13)。

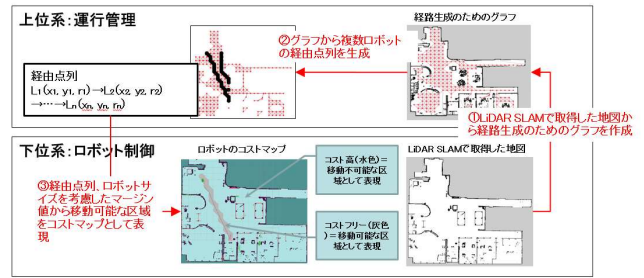


Fig.13. ポテンシャル場を用いた局所経路探索

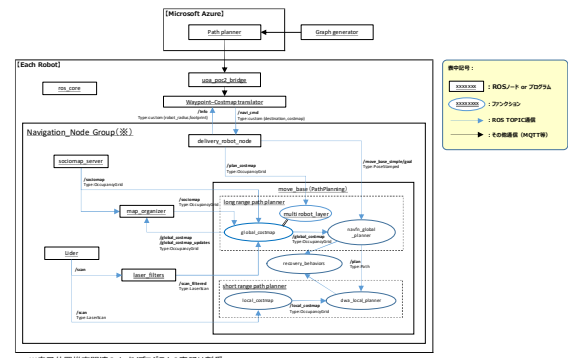


Fig.14. ソフトウェアノード構成

(2) 実証実験

2020/12/16~12/18 に前年と同環境での実証実験を実施。前年度の実証実験 (配送と倉庫間移動) で使用した全経路 (経路点、閉塞区間は設けず) を走行させる他、すれ違い、待ち合せ、障害回避のテストケースを実施した (Fig.15 参照)。

観測障害物の動的地図追加については、上位からのコスト情報により通行可能なエリアを制限している状況であったが、動的障害物をコストマップに反映し、障害物を考慮した経路移動を行うことができた (Fig.16,17 参照)。

ポテンシャル場を用いた局所経路探索については、特にスタックすることなく、全テストケースを走破できた。また、昨年のような複数 WP 指定による直線的な経路移動と違い、途中で不自然に停止することなく曲線的な経路を取り、スムーズな移動ができた。また、ロボット毎の経路が重ならないため、ロボット間の衝突、干渉を回避できた (Fig.18 参照)。

しかしながら、ポテンシャル場により通行可能なエリアを制限している状況での障害物回避を行ったため、ロボットが障害物に接触寸前の経路を取る動作になってしまった。また、通行可能なエリアを遮る障害物が設置された場合、ロボットが局所的な経路を取れずにスタックしてしまうといった事象も発生した。前者については障害物に対してある程度マージンを取った経路を取るようロボットの障害回避機能の改善が必要である。後者についてはロボット側で周辺コストを低減させることで迂回経路探索は可能であるが、上位側が意図する挙動でないことから、どこまでロボット側の動作に自由度を持たせるか、引き続き検討が必要と考えられる。

また、今回静的地図にない障害物をセンサー情報で取得し、マップに反映できるようになったため、上位側に障害物情報を連携することも技術的に可能となった。上位側で現地の障害物情報を認識することでより効率的な大局経路探索が可能となるため、コスト情報による連携など検討できればと考える。

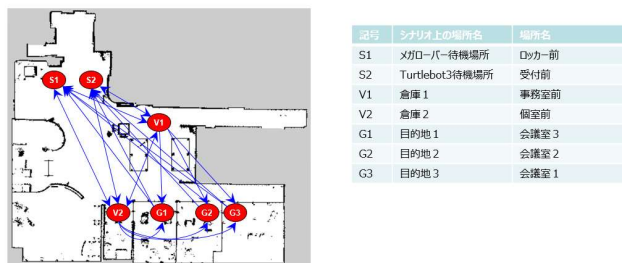


Fig.15. 地点情報と走行経路

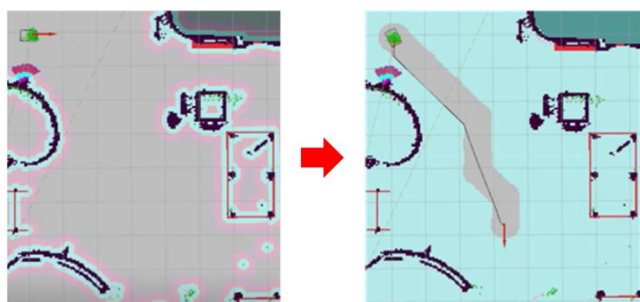


Fig.16. ポテンシャル内で計画された局所経路



Fig.17. 動的障害物の回避のため再計画された局所経路

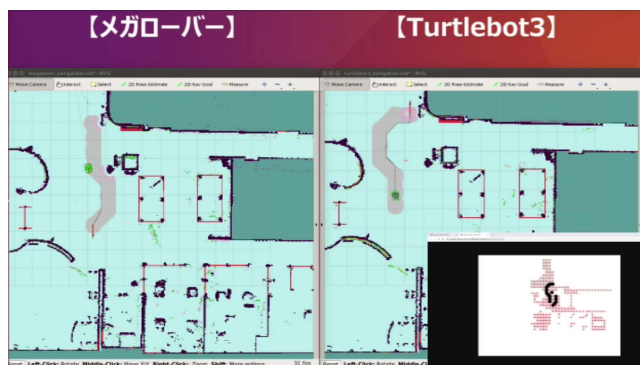


Fig.18. すれ違い検証

(Rviz 画面、右下は上位側の大局経路地図)

3. 技術面以外での成果

本事業では、学生を中心とした災害対応ロボットの研究開発活動にも参画させて頂き、〈2・1〉の改修のサポートやソフトウェア構成管理の支援などを行った。また、映像記録システムの構築支援や WRS デモ会での映像記録の作業なども実施させて頂いた。

これらの活動を通して、ロボット開発における考慮点や問題点、運用方法や安全性の配慮など、社会実装に繋がる様々な知識を得ることができた。今後の事業化に大いに役立てたいと考えている。

4. 事業化に向けての今後の取り組み

弊社は創立以来、様々な業務のソフトウェア開発を手掛けており、ご縁のある企業とのチャンネルを生かして、特にサービスロボットの分野でロボット事業化の展開を進めようと考えている（弊社のイノベーションアーキテクチャについては Fig.19 参照）。

搬送を目的とした自律移動ロボットについては、地域の病院や工場を所有する企業から前向きな意見を頂いており、本プロジェクトで習得した技術やノウハウを成熟させることで提案、受注に繋がれるものと考えている。事業化に向け、以下の3点を重点項目として、自律搬送ロボットソフトウェア群のパッケージ化を進めていく。

(1) 業務システム連携・運用管理ソフトウェアの検討

業務システムや携帯端末からのロボット操作指示や、業務バッチと連動した搬送業務の実行などを行うソフトウェアの開発を行う。

(2) 地図の保守運用の自動化・簡素化の検討

現在手動で実施している地図の保守運用（地図更新等）は、実運用下においては日々行われるものであるが、保守運用のコストを低減させるため、地図作成の自動化、地図承認や編集を行う UI による操作簡素化などを行う。

(3) ロボットのロバスト性・安全性を高める検討

障害物回避機能の強化や、異常時のリカバリ動作（上位側への異常通知や自動的な待機場所への移動）など、実装を行う。

また、弊社は HW を手掛ける会社ではないため、LiDAR+台車ロボットを基本構成とする搬送用ロボットを選定、あるいはロボットを製作頂ける企業への委託・共同開発を具体化していく必要もあり、ソフトウェア開発と合わせて推進していく所存である。

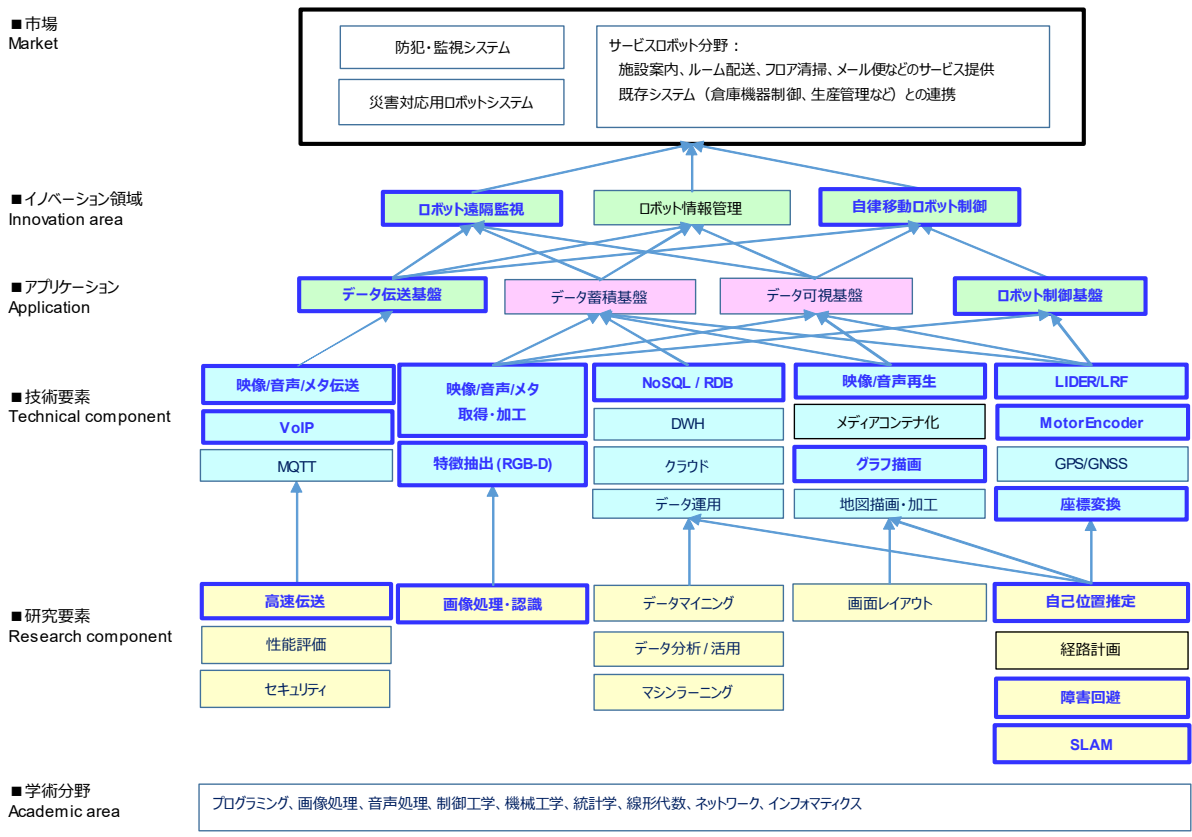


Fig 19. イノベーションアーキテクチャ

5. あとがき

今回、会津大学と産学連携プロジェクトに参画させて頂き、新たな事業に繋がる多くの知見を得ることができた。事業化にはまだ課題も多く、市場への投入には至ってない。課題解決に向け今後も引き続き、様々な場面で連携、ご支援をお願いしていきたい。また、本事業に関わった各企業との交流を持つことができ、それによる繋がり強化、及び新たな繋がりを持つことができ、今後の企業間連携への足掛かりとなると思う。

今後、会津大学、並びに事業に関わった各企業と更なる連携を図り、ロボットソフトウェアの事業を推進し、福島県、そして日本の産業発展に寄与していきたいと考えている。最後に弊社概要を以下に記す。

添付. 1 : 株式会社日本アドシスのご紹介



◆会社概要

社名	株式会社日本アドシス Japan Advanced System co.,ltd.
本社	〒962-0001 福島県須賀川市森宿字狐石128-27
TEL	0248-72-6820
FAX	0248-72-6822
設立	1996年4月
資本金	10百万円
代表取締役社長	若月 吉太郎
従業員	48名
URL	https://www.jadsys.co.jp/

◆沿革

1996年4月	福島県須賀川市西川に会社設立
2004年4月	福島県いわき市平にいわきソフトウェアセンター設立
2006年3月	いわきソフトウェアセンター閉鎖
2007年4月	東京都板橋区坂下に東京事務所準備室設立
2007年7月	東京都港区赤坂に東京ソフトウェアセンター開設
2007年10月	東京都港区南青山（乃木坂）に東京ソフトウェアセンター移転
2013年4月	福島県廃炉・除染ロボット技術研究会に入会
2015年11月	福島県須賀川市森宿に本社を移転（自社所有）
2016年8月	東京都港区南青山（外苑前）に東京ソフトウェアセンター移転
2017年4月	ふくしまロボット産業推進協議会に入会
2018年5月	本社内にセキュリティルームを設置
2018年7月	東京都千代田区神田錦町に東京ソフトウェアセンター移転
2019年4月	一般社団法人日本ロボット学会に入会

3.5. 福島コンピューターシステムの取組み

福島コンピューターシステム株式会社 永井 朝祐 橋本 瑞樹

概要：弊社は会津大学との産学連携にて「変形する物体と剛体との間の力学的シミュレーション技術調査」として2019年1月より参加した。ここでは担当した技術調査にて獲得した技術および成果について報告する。

1. まえがき

東日本大震災・原発事故からの復旧・復興に向けての「課題」がまだまだ残っている。その一方で、地域の産業復興に向けた新たな取組みも進んでいる。ふるさとの復興につながる事業へ積極的に取組むことが、地元を本拠とする弊社の存在理由であり、企業理念である「より良い未来」に繋がるものと考えている。ロボット関連分野についても重きを置き、国・県・市町村を始め、福島県内の産業界とともに、積極的に取り組んでいく。

現在、災害対応などのロボット開発において、ロボット操作や操縦訓練のために、ロボットシミュレータを用いている。本調査にて、Choreonoid によるロボット開発のノウハウを獲得し、シミュレータのロボットモデル、環境モデルの作成、拡張機能を持たせたプラグインの開発を行い、ユーザーにご利用いただけるサービスを提供していきたいと考えている。

2. プロジェクトでの取り組み

〈2・1〉これまでの経緯

本プロジェクトは、ロボット(多体)シミュレーションの現状として、そのほとんどが剛体シミュレーションのみで、Choreonoid(AGX Dynamics プラグイン追加)の使用で初めてクローラベルト(剛体プレートと、2次元メッシュ)やホース(1次元)などが実装された。

AGX Dynamics の現状として、3次元空間における柔軟モデルでは1次元(ワイヤー)は公開しており、2次元(布など)は検討中、3次元に関しては未対応、学術的段階だった点があり、Choreonoid/AGX Dynamics の環境で3次元柔軟物体のクラスをモデル化し、剛体モデルとの多体シミュレーションの実現を目指して始動した。

柔軟物体をシミュレーションするにあたり、剛体同士ではなく、剛体、柔軟物体同士の干渉、拘束条件を考察した。剛体同士の拘束条件としては、1点に対して干渉判定を行うのに対し、柔軟物体、剛体同士としては柔軟物体の形状変化や剛体に対して多点接触となる点を考慮する必要があることが判明した。また AGX Dynamics プラグインの仕様を確認する必要がある。そのため、始めにChoreonoid、AGX Dynamics プラグ

イン追加環境の構築、AGX Dynamics の柔軟物体として活用できる技術仕様の調査、仕様を確認したのち、3次元での柔軟物体モデルの原理モデルの構築、ロボットモデルに適用しロボットシミュレーションでの実行の流れで調査、検証を進めた。

〈2・2〉Choreonoid/AGX Dynamics プラグインの調査

始めにChoreonoid/AGX Dynamics の環境をUbuntuにて構築した。続けてAGX Dynamics における柔軟物体となるモデルクラスを調査し、ケーブルクラス、ワイヤークラス、タイヤクラス、地形クラスが挙げられた。この中ではタイヤクラス、地形クラスは特定の形状、用途で使用されるため、ケーブルクラス、ワイヤークラスが適正と判断。さらにChoreonoid で使用するAGX Dynamics プラグイン内ではワイヤークラスが使用可能であったためワイヤークラスの技術的仕様を調査した。物理マテリアルの追加パラメータとしてヤング率、スクープダンパを設定できることが判明したため、ワイヤークラスを用いて3次元の柔軟物体モデルを構築することとした。

〈2・3〉3次元柔軟物体原理モデルの検討

3次元柔軟物体モデルの原理モデルとしてまず、立方体モデルを考察した。各頂点は剛体で定義、剛体同士を接続する箇所をワイヤークラスで定義した。

シミュレーション上で立方体モデルを落下させるとZ軸の弾性は確認できたが、X、Y軸方向の弾性表現ができていないことが判明した。

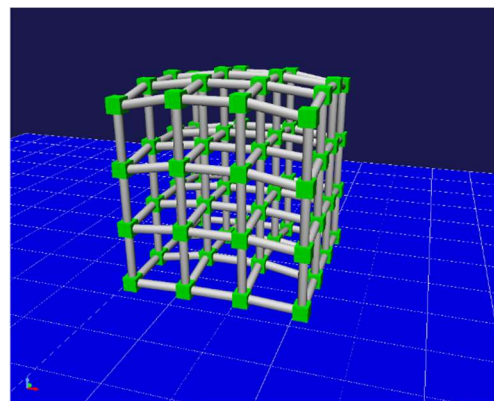


Fig. 1. 柔軟物体_立方体モデル.

そのため、立方体内部にシリンダー状の剛体を追加し、同様のシミュレーションを実施したところ、わずかながら X、Y 軸への弾性を確認することができた。

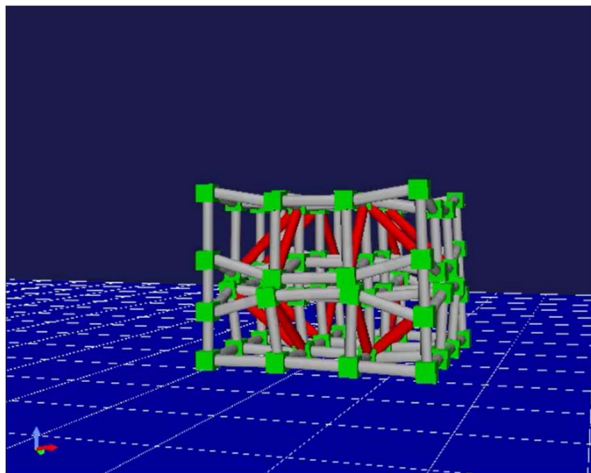


Fig. 2. 柔軟物体_立方体モデル_シリンダー追加

しかし、この原理モデルを使用するにあたり、モデルを小さくするほど、弾性のシミュレーションが困難になり、伸縮後から元の形状に戻らなくなる。また、ワイヤーの干渉計算の精度は高くなく、剛体やワイヤー同士が干渉するとワイヤーが発振し、シミュレーション自体が止まることがある。

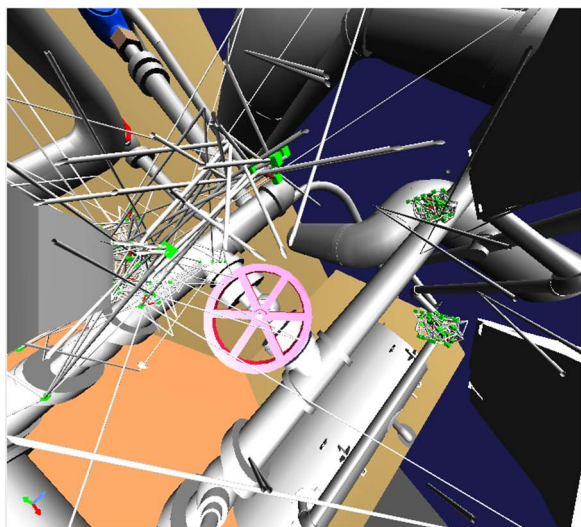


Fig. 3. 柔軟物体_立方体モデル_ワイヤー発振

この課題の解決策として、ワイヤークラス関連のワイヤーおよび剛体との干渉計算機能を OFF にし、弾性のシミュレーションのみ行うように変更。また、Choreonoid では剛体に親リンクからみた剛体の挙動を関節タイプとして定義することができ、原理モデルに使用した剛体には直動関節として定義した。そのため、X、Y 軸方向に接続したワイヤークラス自体は挙動に影響がないことから、立方体にこだわらない柔軟物体原理モデルの構築を行った。

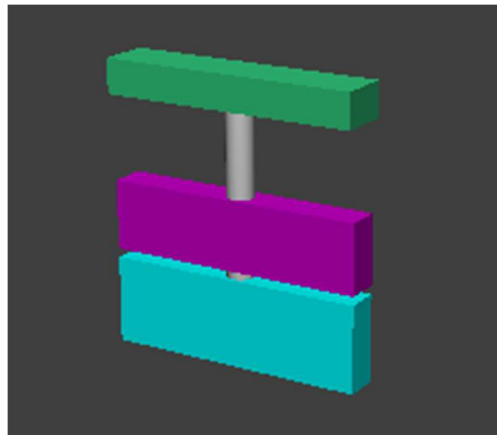


Fig. 4. 柔軟物体_原理モデル

新たに構築したモデルにて使用したリンクは、すべて剛体である。シアンはロボットと接続する物体、マゼンタの剛体は緑の剛体が伸縮時、シアンに侵入、干渉しすぎないように設置した物体、緑の剛体は他の剛体と接触する物体として作成。シアンと緑の剛体間をワイヤークラスで接続している。マゼンタとはワイヤークラスの関連の干渉機能を OFF にしているため緑の剛体のみ干渉が発生する。緑の剛体はマゼンタの剛体に対し Z 軸での直動関節として定義している。この原理モデルを最小単位とし、組み合わせることにより柔軟物体モデルを作成することとした。

〈2.4〉 ロボットシミュレーション

ロボットシミュレーションにて挙動の検証を行うため、使用するスパイダーのロボットハンドに、指サックのように柔軟物体モデルを装着し、検証した。

前述で作成した原理モデルを放射状に組み合わせることで、疑似的な指サックを作成。また、外部メッシュファイルを用いて、緑の剛体に適用し、シアンおよびマゼンタの剛体を覆うことでより滑らかな見た目に調整した。スパイダーのロボットハンドには、検証しやすいよう指先に装着した。

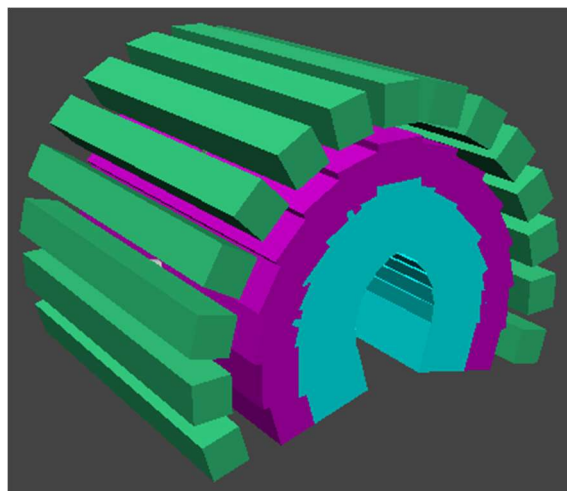


Fig. 5. 柔軟物体_疑似指サック作成

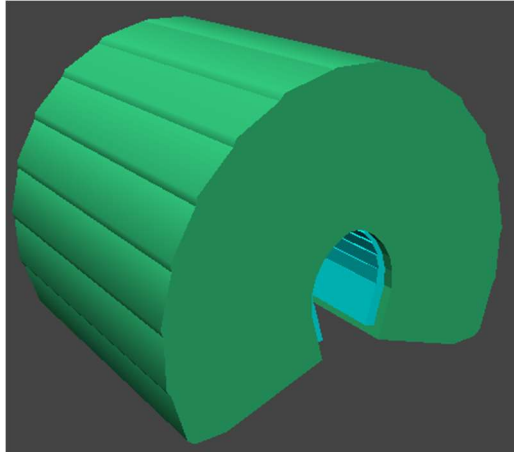


Fig. 6. 柔軟物体_外部メッシュファイル使用

実際にシミュレーションを実行し、ハンドルを把持したところ、指サックのようにハンドルに接触した箇所のみ伸縮し、離す際にも元の形状に戻ることが確認できた。また、放射状に定義したことで、X、Y 軸方向にも弾性を表現できることが判明した。

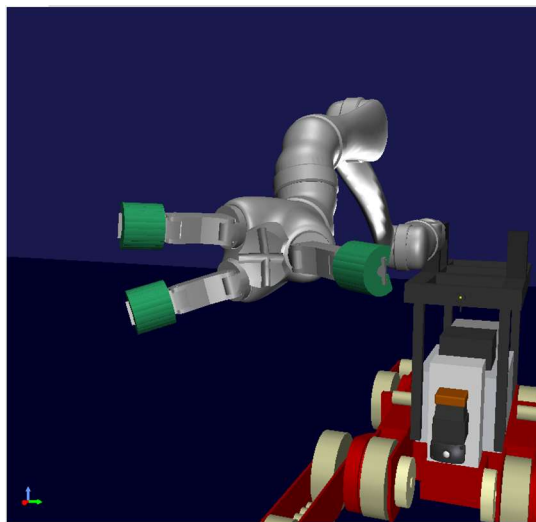


Fig. 7. 疑似指サック装着

加えて、ハンドルを回す挙動について摩擦についても考察する必要があった。摩擦については AGX Dynamics プラグインにて追加された物理パラメータ(ContactMaterial)にて調整した。なお、今回は視覚的に挙動を現実の柔軟物体に近づけたため、詳細な設定値については割愛する。

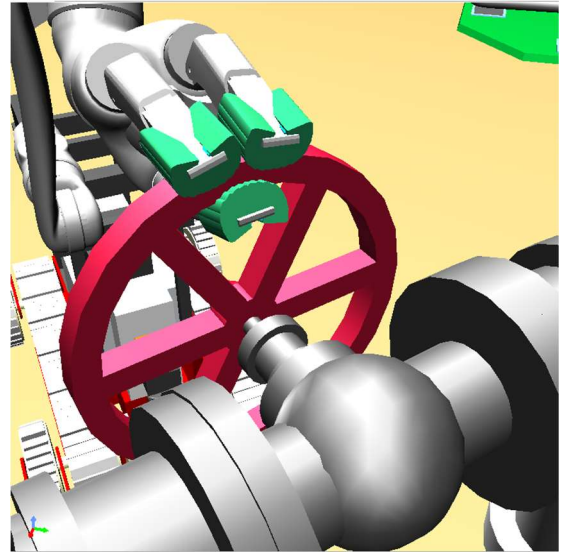


Fig. 8. シミュレーション挙動確認

〈2・5〉 ロボットシミュレーション検証用プラグイン開発

柔軟物体モデルを構築検証するにあたり、効率よく進めるため、また、今後の開発の参考を目的に、専用の Choreonoid プラグイン開発を行った。

AGX Dynamics プラグインではマテリアルファイルというファイルに摩擦やヤング率、スプークダンパを定義して、シミュレーションの開始、停止を繰り返すため、Choreonoid の画面内でその工程を完結できるようにヤング率、スプークダンパ、物理パラメータをプロパティ表示、編集するプラグインを作成した。結果、柔軟物体モデルの挙動を検証する効率が上がった。また、プラグイン開発のノウハウを習得することもできた。

〈2・6〉 今後の課題

本研究にて検証した指サックの挙動については、学術的な数値解析は考慮しておらず、シミュレーション上で近似的な柔軟物体を再現したに過ぎない。しかしながら、3次元柔軟物体モデルの原理モデル(Fig.4)を組み合わせることで、様々な柔軟物体モデルを構築できることが可能と思われる。ただし、モデルの複雑度によっては、柔軟物体モデル適用前と比較して計算速度に大きく差が出るということが判明したため、モデルの軽量化、および検証する柔軟物体の学術的な数値解析を進める必要があると思われる。

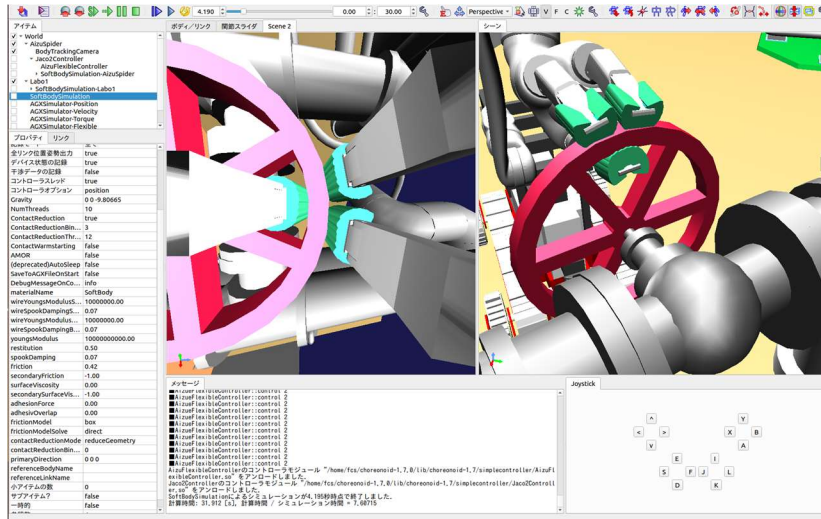


Fig. 9. プラグイン作成による検証画面例

3. 今後の事業展開

今後の事業展開としては、本調査を通して、剛体と柔軟物体の表現手法などの要素技術の習得、活用を目指し、シミュレーションが実現されていない柔軟物体モデルの作成や利用をプラグイン化し、サービスの提供、ビジネス化を目指していきたいと考えている。

4. 最後に

弊社はロボット関連分野にも取り組みを始めており、ロボットプログラミングを習得、一部は事業化を行っている。この度の産学連携では、ロボットシミュレータ開発について、特に Choreonoid の開発について技術深耕を図ることができた。柔軟物体の表現において、拘束条件を多点で考慮しなければならないなど、学術的な点について、ご教授いただくこともあり、ロボット分野の課題により触れることもできた。また、今回の取組みにて得られた交流をより深くし、今後のロボット分野への事業展開も行えればと考えている。

3.6. AquaCrew の取組み

アクアクルー株式会社 佐藤 彰

概要：本プロジェクトにおいて、弊社は会津大学様と開発してきた上・下水道レガシーシステムの24時間監視システムをさらにアップグレードさせ遠隔操作する仕組みを開発した。これらの経験より、今までよりさらに精度の高い点検業務と開発してきたシステムの販路拡大をねらい、事業展開する。

1. まえがき

下水処理をはじめとした水処理管理は、日本の国土保全に非常に重要なものである。農業集落等の僻地の水処理管理には、特にマンホールポンプや農業集落排水処理施設にて特定の設備を持つ施設は2週間に1回以上の点検が義務づけられている[1]が、24時間稼働している施設に対して2週間に1時間程度の点検以外は放置されているという状況であるため、ポンプ等の故障により汚水が流れ出てしまう等の問題が発生する可能性が高い。弊社は、会津大学と共に、こうした水処理施設で使用されているレガシーシステムを、画像処理とクランプ型電流計を用いてクラウド化し、遠隔監視するシステムを構築する事により、24時間監視を実現する事とシステムの販売を実証してきた。[2]

本事業においては、ロボットシステムの設計を明確に行うSysML[3]の設計やOpenRTM[4]によるロボットコンポーネントの開発、遠隔監視から遠隔管理するためのロボットを開発する事で、システムの販路拡大やより正確な点検業務を行うためのさらなる第一歩である。

2. 開発したシステムの成果物

〈2・1〉 SysML を用いたシステムの設計

SysMLの柱となる、Requirement図、activity図、ユースケース図、内部ブロック図を用いて、システムを設計するに当たっての要件を明らかにした。Requirement図でシステムの要件を洗い出し、Activity図でシステムの流れを考え、ユースケース図でシステムの振る舞いを定義し、内部ブロック図で作成すべきコンポーネントを明確にした。

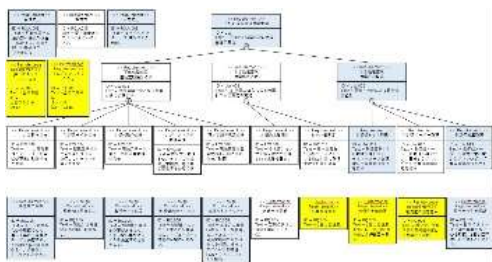


図1. Requirement図

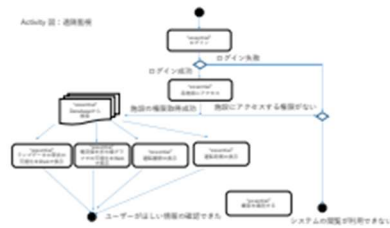


図2. Activity図

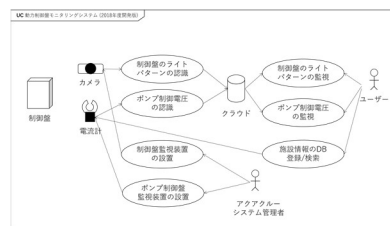


図3. ユースケース図

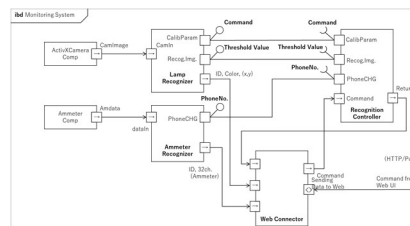


図4. 内部ブロック図

〈2・2〉 スイッチロボットの設計

また、スイッチロボットを作成するためにスイッチロボットの設計を行った。設計した遠隔操作するためのスイッチロボットについて、図5に2次元、図6に3Dの図面を示す。

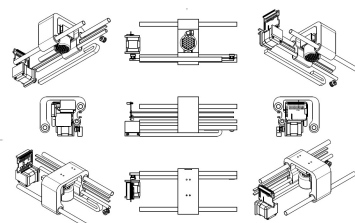


図5. 2Dスイッチロボット図面

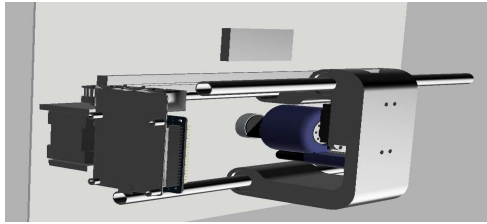


図 6. 3D スイッチロボット図面

〈2・3〉 画像処理によるアナログメータの認識

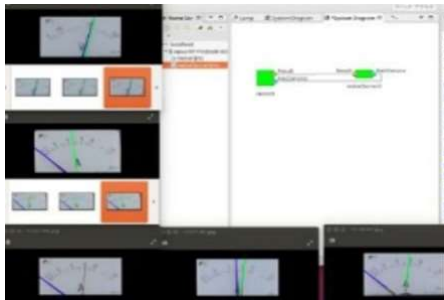


図 7. アナログメーター認識コンポーネント

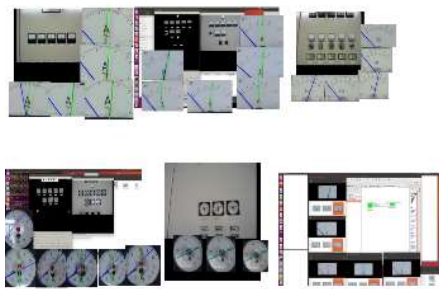


図 8. 5 施設で実証実験

Web カメラにアナログメーター認識コンポーネントを拡張するにあたって、既に具備されている Web カメラの画像をそのまま利用してアナログメーターの認識を複数行った。

アナログメーターの針の角度の認識には Hough 変換を用いた。初めに、メーターの領域を切り出し、大津の二値化によって得られた画像に対して Hough 変換を行うことで、直線の角度を (1) の数式で取得することが出来る。

$$(式) H(r, \theta) = \sum I(x \cdot \cos \theta, y \cdot \sin \theta) \dots \dots \dots (1)$$

さらに、実証試験を図 8 の通り、猪苗代の 5 施設で試験を行った。

今回、現場の都合もあり、角度と電流値の整合性については、rad=0 の時、0A,rad=2.2 の時に 7A という標記にしている。

〈2・4〉 スイッチロボットの開発と OpenRTM 化

開発した Cad によるスイッチロボットの設計図、試作機、旋回機構部を図に示す。更に、それぞれの動作を OpenRTM により制御した。

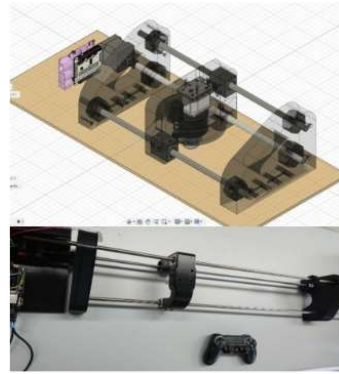


図 9. 3DCad によるスイッチロボットの試作機



図 10. スイッチロボットの旋回部分

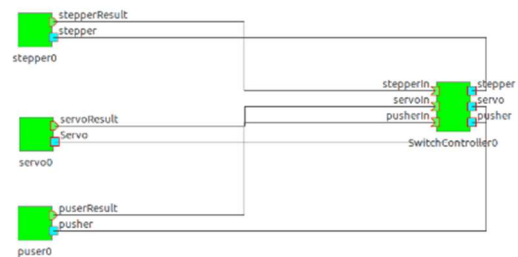


図 11. スイッチロボットを制御する OpenRTM

OpenRTM により制御される構成については、stepper,servo,pusher,controller であり、stepper はスイッチの位置決めを行い、servo はスイッチを回転させ、pusher でスイッチを押しに行く動作を行う。

Controller では、現在の状態を表示させ、サービスポートを利用する事で動作指示命令を待つ状態にある。Stepper は、0~10000 のパラメーターを送信する事によりロボットが移動するが、数が多いほど移動する距離も大きくなる。Pusher については、-40~100 のパラメータを用意し、MAX100 のパラメーターを送信すると、スイッチを回しに行く距離ぶんだけピンが押し出される。逆に、-40 を入力する事により、スイッチロボットのピンが元の状態に戻る事になる。

Servo については、パラメーターに、a,b,c のコマンドを用意し、a を入力すると、60°回転し、b を入力すると、120°回転する。c を入力した時に-120°回転し、元の状態に戻る仕様になっている。

〈2・5〉 MQTT 通信モジュール、RDR を利用したモニタリングシステムの開発



図 12. ランプ認識コンポーネント

図 12 のように、ランプの設置された制御盤を研究室内に設置した。ランプには、緑、赤、黄色の色が表示されており、USB カメラでランプの色を認識させ、1 分に 1 回 RDR の 1 次 DB にデータを送信した。通信方式は会津大学様が開発した MQTT 通信モジュールを利用した。



図 13. 東日本計算センター様に開発していただいた RDR データ検索システム

更に、図 13 のような東日本計算センター様が開発した RDR の 2 次 DB からデータを検索し json 形式で取得する事で図 14 のような画面をインターネット上で表示させ、遠隔から監視する事が可能になった。Ajax でデータを取得する事も可能であり、弊社では ajax でデータを取得した。



図 14. インターネット上で閲覧できるフロントエンド

図 14 の情報からは、24 時間ランプの色情報がわかり、かつ稼働情報も閲覧する事が可能である。

〈2・6〉 クラウドを利用したスイッチロボットの遠隔操作

従来までは、常にローカルエリア内で動作させていたスイッチロボットを、クラウドを介して遠隔から操作させた。その内容を図 15 に示す。

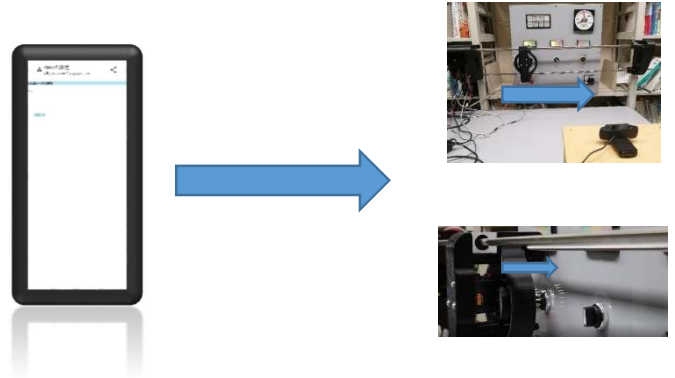


図 15. スマートフォンでロボットを遠隔操作

3. 習得した技術について

弊社では以下の技術を習得した

- ・ OpenRTM を利用したロボットコンポーネントの開発
- ・ ラズベリーパイや、アルディーノを利用したモータやアクチュエータの制御
- ・ MQTT を利用したデータ通信手法
- ・ ディープラーニングを利用した画像処理技術
- ・ クラウドを利用したロボットの遠隔操作技術

4. 事業展開について

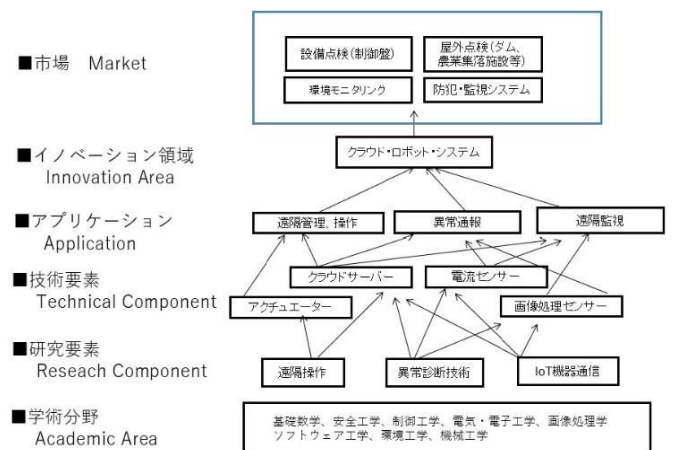


図 16. イノベーションアーキテクチャ図

弊社では、図 16 のようなイノベーションアーキテクチャ図を想定している。

市場としては、下水処理場にこだわらず全ての制御盤をターゲットにしている。当初は、農業集落排水処理施設やマンホール制御盤のような制御盤のある施設を対象にしてきたが、本事業の成果もあり、配水池や井戸ポンプのある施設への装置の設置の依頼もあり、4月から設置予定である。今後、上・下水道とわず様々な制御盤に設置すると共に、MQTT 通信技術や、スイッチロボットを応用し、複数施設の制御盤を一括管理していきたいと考えている。

5. まとめ

弊社は、ステージ II からプロジェクトに参画させていただき、多くの成果を得る事ができた。技術面では、今までは携わる事なかったロボットの技術を習得する事ができた。交流面に関しては、会津大学様だけでなく株式会社東日本計算センター様と共同で試験を行った事、その他の企業の方々にも弊社のプロジェクトにたいして様々なアドバイスをご教授いただく事ができた。この経験を生かして、システムの拡大・拡張を行うと共に、ロボット分野へのシステムも導入していければと考えている。

文 献

- [1] 環境省, “環境省関係浄化槽法施行規則,” https://elaws.egov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=359M50000100017, 2008.
- [2] 佐藤彰, 矢口勇一, 井上千徳, 岡隆一, 成瀬継太郎, “ICT 技術を用いたレガシー水処理システムのクラウド化,” 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集 2018(0), 29-29, 2018
- [3] Holt, J., & Perry, S. (2008). SysML for systems engineering (Vol. 7). IET
- [4] Ando, Noriaki, Takashi Suehiro, and Tetsuo Kotoku. "A software platform for component based rt-system development: Openrtm-aist." International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

3.7. 会津ラボの取組み

—サーモセンサーモジュールによるサーモデータ解析及び物体検知への応用研究—

株式会社会津ラボ 石川 慧 山口 幸則 安瀬 洋一 遠藤 貴幸

概要：屋内フィールドにおけるロボット走行時に障害物を検知し、走行補助をするため、赤外線アレイセンサーを用いて、屋内の熱画像を取得、データ解析をおこない、人などの温度を発生させている障害物の認識をする。また、熱データを RDR に保存し、他のセンサーデータと組み合わせ、解析することでより精度の高いロボット走行の実現を目指す。

1. 背景

近年、ロボットの機械学習を用いた自動走行技術の発展により、より複雑な動きが可能となっており、自動運転車両においては、実走行の実用化も目途が立ってきている。

しかしながら、それに伴って、より精度の高い空間認識能力が求められるようになってきた。カメラ画像や LIDAR などのセンサー単体からのデータ解析のみでは、環境がコントロールされていない実環境でのロボットの運用は難しい。実用化にむけて、より信頼性の高い空間認識能力の達成のため、多種多様なセンサーからのデータを統合し、解析する必要があると考える。その一つの選択肢として、赤外線アレイセンサーがあげられる。赤外線アレイセンサーは、すでにエアコンや照明等の人体検知システムに用いられ実用化されており、比較的安価に導入でき、ロボットの物体・障害物検知用の他のセンサーとの併用が容易であると考えられる。

本事業では、ロボットの走行補助等の連携に向けた赤外線アレイセンサーによる物体検知システムの実証及び開発を目指すものである。

2. システム概要

〈2・1〉サーモアレイ物体検知システム構成

赤外線サーモアレイセンサーを用いた物体検知システムは以下の三つのモジュールで構成されている(図 1、2 参照)。

- 赤外線アレイセンサーモジュールユニット
- MQTT 中継用サーバ
- RDR データサーバ

赤外線サーモアレイユニットは、2019 年度に 4 台製作し、LICTiA 1F フロアに設置、単体実験を行なった。

2020 年度には、フロア内を広範囲にわたってカバーできるように追加で 12 台(内 2 台カメラ無し)を作成し設置を行なった。

各センサーユニットからの赤外線データは一時的に中継サーバに MQTT 通信で送られ、統合された後、UBIC ネット

ワークを通じて、OpenRTM-aist 用 MQTT 通信モジュールを通じて DBRTC で RDR 上の MongoDB に格納される構成となっている(図 2)。

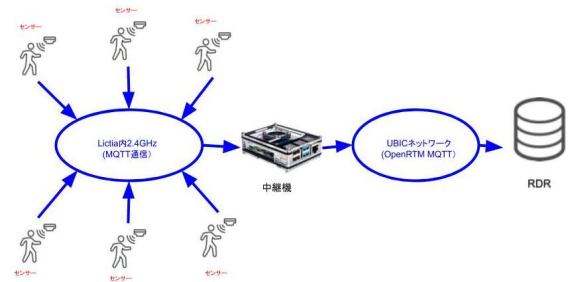


図 1. 実証実験構成図

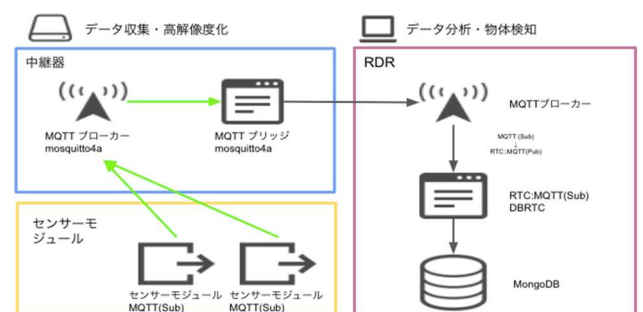


図 2. システム構成図

〈2・2〉赤外線アレイセンサーユニット

赤外線アレイセンサーユニットは、Panasonic 製 GRID-EYE(AMG8833)赤外線アレイセンサーを I2C 通信で Raspberry Pi Zero で繋げたハードウェア構成となっている(図 3、4)。また、調整、実験用として、Raspberry Pi Camera V2 モジュールが 16 台のうち 14 台に搭載されている。OS は Raspbian Buster を採用し、Mosquitto MQTT ブローカーを使用し通信を行なっている。実際のシステムプログラムは Python3.6 を使用している。

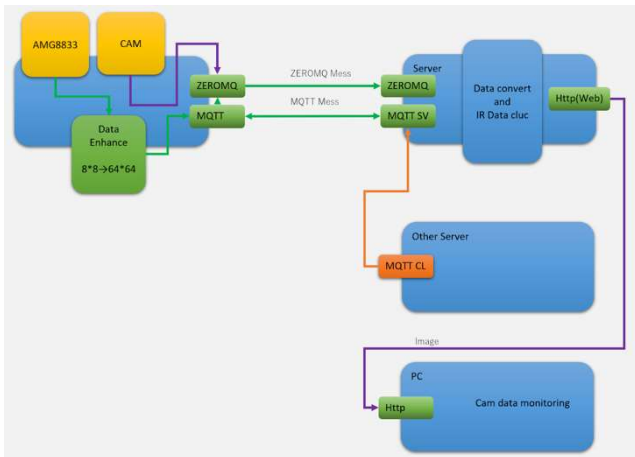


図 3. 赤外線レイセンサーモジュールユニット

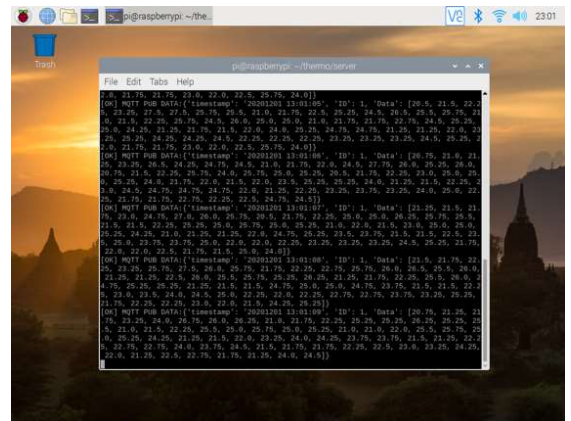


図 5. 中継器からのデータ送信



図 4. 実際の設置状況

(2・3) サーバ構成

中継用一次サーバは、当初、クラウドサービスの利用を考えていたが、UBIC ネットワークとの通信量制限や保守運用等の理由から、簡易的に Raspberry pi 4 で実装することとなった。

各センサーユニットから毎秒 64 個の float 型配列データが MQTT で受信され、JSON 形式でデータを統合し、OpenRTM 通信用に TimesString 形式に変換後、OpenRTM-aist 用 MQTT 通信モジュールを利用して、UBIC ネットワーク経由で RDR に送信されている (図 5)。OS は Raspbian Buster を使用し、OpenCV を利用して、ヒートマップの作成等も可能になっている。システムプログラムは Python3.7 を使用している。OpenRTM-aist 用 MQTT 通信モジュールについての詳しい内容については、文献 1 を参照されたい。

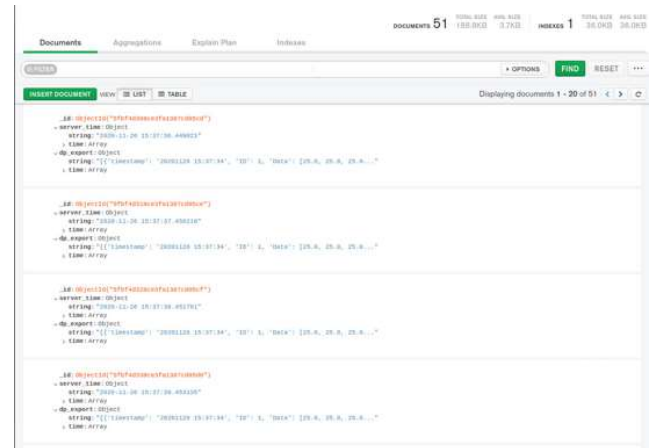


図 6. RDR へのデータ書き込み

RDR データサーバは、東日本計算センターの協力のもと、OpenRTM-aist 用 MQTT 通信モジュールで通信後、DBRTC (文献 2) を利用して、MongoDB に格納している (図 6)。

3. 実証実験結果

会津大学 LICTiA 1F に赤外線サーモアレユニットを 16 台及び中継サーバ 1 台を設置し、フロア上を通る物体の観測を行った。

サーモアレユニットから中継器までの通信は問題なく行われたが、LICTiA 内の通信環境の問題で、中継器から RDR への通信が難航したが、最終的には、無事通信が行われたことが確認された。物体の認識に関しては、人のような温度を発生する物体に関しては、問題なく認識することが確認された。しかしながら、缶コーヒーのような比較的小さい物体に関しては、地面に置いた場合は、距離の関係上認識ができなかった (図 7, 8)。これは、GRID-EYE の感度限界であるため (文献 3)、ソフトウェア面での改良は難しい。また、ロボットのような周囲の温度とほぼ変わらない物体に関しては、検知できなかった。



図 7. 缶コーヒー画像のヒートマップ合成

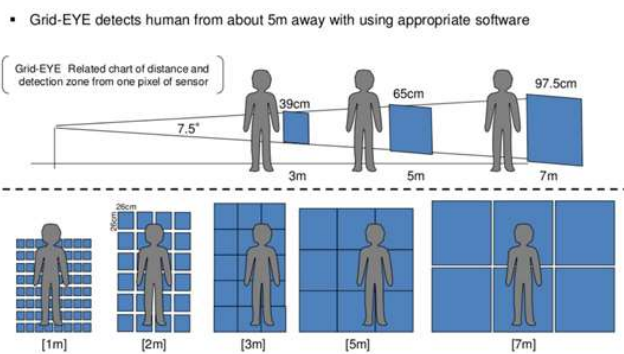


図 8. GRID-EYE 距離判別限界 (文献 3)

また、本実験では、東日本計算センター及び日本アドシス協力のもと、格納データからヒートマップを作成し、同時刻の動画から、人及びロボット走行の解析実験も行った。ヒートマップに関しては、格納された 8×8 の数値配列を Bicubic アルゴリズム (文献 4) により 64×64 に拡張して作成している。詳しい内容は、東日本計算センターの報告書を参照されたい。

4. 最後に

赤外線アレイセンサーを用いて、障害物検知の補助の一助を担う目的としては、人などの温度を発する物体に関して認識が可能であることが分かったため、他のセンサーと組み合わせることによって、より精度の高いロボット走行に生かせると思う。しかしながら、システム設計に関しては、いくつか見直しの必要性があると思う。第一に、現在のシステム設計では、各センサーユニットのデータを一度中継器で統合してから送っているが、これが通信のボトルネックとなっているため、リアルタイム性を要される場合には、問題となっている。そのため、各センサーユニットからのデータを直接使用できる設計に見直す必要があると思う。

第二に RDR 上で DB に書き込む際に DBRTC (文献 2) を使用しているが、Python2.7 で書かれており、セキュリティや互換性の問題から、早急に別のものに切り替える必要があると思う。

- (1) Daishi Yoshino : “OpenRTM-aist Python 用 Paho MQTT 通信モジュール”, Github, URL: https://github.com/dyubicuoa/OpenRTM_aist_paho_mqtt_interface (Last Access, 2021.02.09)
- (2) “DBRTC ツール群”, URL: <https://rtc-fukushima.jp/technical/2569/>, (Last Access 2021.02.09)
- (3) Panasonic inc., “赤外線アレイセンサ GRID-EYE データシート”, URL: <https://industrial.panasonic.com/jp/products/sensors/built-in-sensors/grid-eye>
- (4) R. Keys (1981). “Cubic convolution interpolation for digital image processing”. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* **29** (6): 1153-1160.

3.8. ネットワンステムズ of 取組み

ー サービスロボット・セキュリティの研究開発 ー

ネットワンステムズ株式会社 山崎 治郎

概要：弊社は、2018 年度から共同研究という形で当プロジェクトに参画し、サービスロボット・セキュリティの研究開発をテーマに活動してきた。その活動を通じて、サービスロボット・セキュリティガイドラインを作成・公開するとともに、セキュリティ攻撃の影響実測を行う実証実験、さらにはガイドラインに沿ったセキュリティ脅威分析の演習などを手掛けてきた。

1. 前書き

弊社は、1988 年の創業時から長年に渡って大手企業や通信事業者のネットワーク設計・構築を多数手がけ、サイバーセキュリティへも重点的に取り組んできた。産学連携活動にも力を入れており、会津大学とは学内 LAN の設計・構築を手掛けるとともに、サイバーセキュリティ演習講座を開講するなどの実績がある。本プロジェクトには 2018 年度から参画し、サービスロボットのセキュリティを主要テーマとして会津大学との共同研究活動を行ってきた。

〈1・1〉研究開発テーマの背景

ロボットを取り巻く環境は近年大きく変化をとげている。従来のロボットは、産業用ロボットに代表されるように工場の中などの特定の環境下で特定の仕事を繰り返し行うことが中心であった。また、外界との通信から切り離された閉じた環境で動作していた。近年はサービスロボットという言葉で表されるように、日常生活において人間と共生しながら様々な仕事を行い、ネットワークを通じて様々な情報を交換するようになりつつある。単体のロボットの中で完結していた機能もネットワーク・クラウドを介して分散化されそれらが連携して動作する“クラウドロボティクス”という概念も生まれてきた。

クラウドロボティクスでは、ロボットの多様な機能要素が分散化され相互に連携しながら様々な環境の中で様々な用途の仕事を実行する。外部環境から閉ざされていた従来のロボットに比べ、通信手段であるネットワークとそのセキュリティの確保が重要性を増すことになる。(Fig.1 参照)

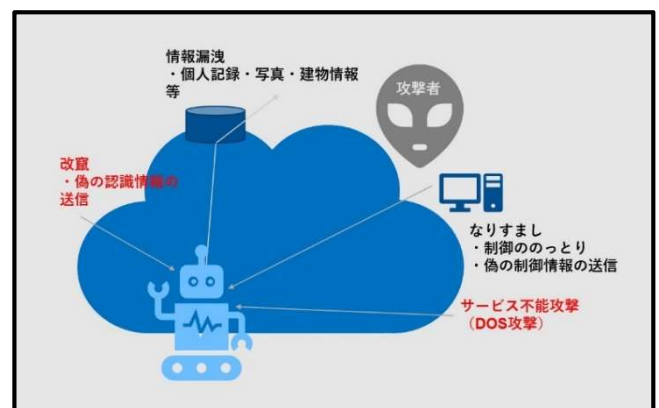


Fig 1. クラウドロボティクスにより増大するセキュリティ脅威

〈1・2〉研究対象のロボットの分類・セキュリティ

ロボットには使用される環境や目的、提供する機能などで様々な分類がある。本研究では、その中でも日常生活の中で人間と共生しながら様々な支援を提供する“生活支援型サービスロボット”を対象としてセキュリティの検討を開始した。対象となるセキュリティの範囲も開発者向け、運用者向けなどによって視点も様々である。本研究では、ロボットシステムの設計・開発者を対象にし、実装する機能において想定される脅威の分析と対策の検討を主眼においた。

2. プロジェクトでの取り組み

〈2・1〉関連動向の調査 (2018 年度前半)

2018 年度の研究開始初期には、ロボットのセキュリティに関連する IoT や安全性などの規格や標準化動向の調査を重点的に行った。

全体的な傾向として、IPA (情報処理推進機構) などの情報処理を推進する団体や総務省から IoT に関するセキュリティガイドラインが 2016 年ごろから複数発行されている。(Table. 1 参照) また、品質保証団体を中心にロボットの安全性についての規格も複数種類発行されている。一方産業用ロボット

を含む制御系システムについては、IEC62443-1-4 が公開されている。ただし、本研究が対象としているサービスロボットにフォーカスしたセキュリティに関しては規格・ガイドラインは皆無であるという結果が得られた。

Table 1. 情報セキュリティ団体による IoT 関連のセキュリティガイドライン

名称	組織	発刊日
“つながる世界の開発指針”	IPA (独立行政法人 情報処理推進機構)	2017年6月第2版
“IoT 開発におけるセキュリティ設計の手引き”	IPA (独立行政法人 情報処理推進機構)	2018年4月最新版
IoT セキュリティガイドライン Ver1.0	IoT 推進コンソーシアム、総務省、経済産業省	2016年7月版
「つながる世界」を破壊させないためのセキュアな IoT 製品開発 13 のステップ	CSA (クラウドセキュリティアライアンス) ジャパン	2017年6月版

〈2.2〉 サービスロボットの特徴を踏まえた脅威分析 (2018 年度後半)

サービスロボットは、関連している情報やシステムが多岐にわたること、利用される環境が限定されないことから、ソフトウェアの構造やシステム間の通信フローも複雑である。(Fig.2 参照) 従来のサイバーセキュリティにはない脅威やリスクが生まれる可能性がある。

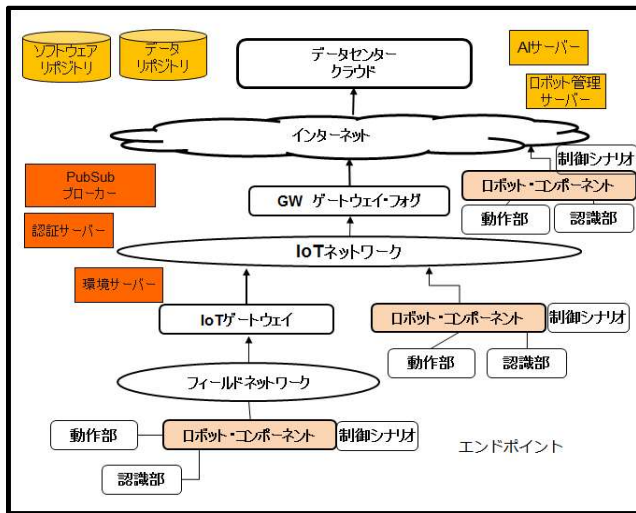


Fig 2. ロボットシステム ネットワーク構成図例

本研究ではシステムの実例を対象に複数の分析フレームワークを複合的に取り入れて以下の脅威分析を行うこととした。

- ・ 開発者視点での脅威の洗い出し・分類
- ・ 利用形態と攻撃パターンの分析 (ミスユースケース分析)

- ・ 脅威の相互関係の分析 (アタックツリー分析)
- ・ ネットワーク構成・通信フローの整理

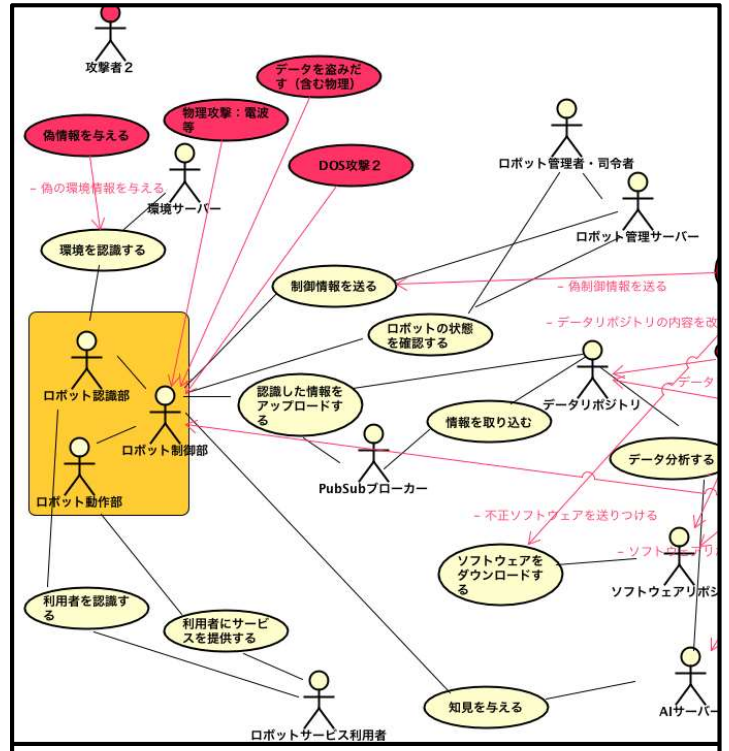


Fig 3. ミスユースケース分析例 (抜粋)

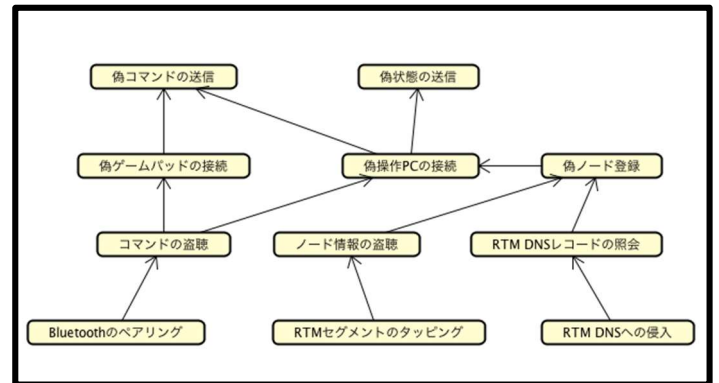


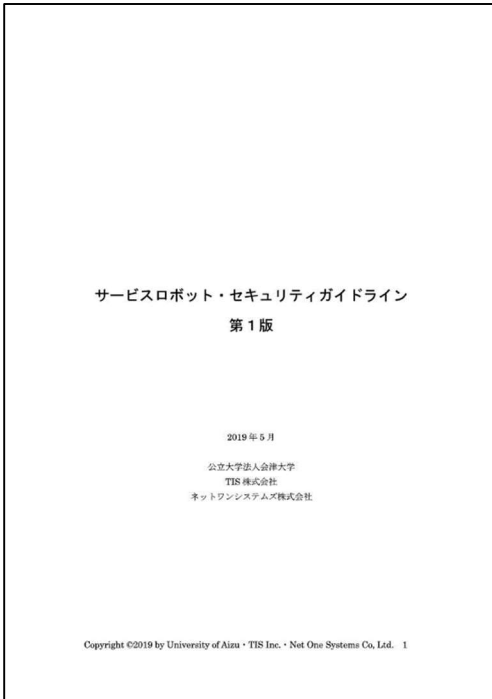
Fig 4. アタックツリー分析例

〈2.3〉 サービスロボット・セキュリティガイドラインの作成・公開 (2019 年 5 月~)

具体的なシステムを元に行ったセキュリティ上の脅威分析・リスク評価の内容と対策の検討手法を“サービスロボット・セキュリティガイドライン第1版”としてまとめ、2019年5月より一般公開を開始した。

公開 URL : <https://rtc-fukushima.jp/technical/3170>

IPA などの各種関連団体にもその内容を紹介し、各方面からのコメントを受け付けることとした。



(a) サービスロボット・セキュリティガイドライン表紙

目次	
1. はじめに 本書の内容と目的	4
1-1. ロボット・セキュリティの現状と課題	4
1-2. 本書の目的	4
2. 対象ロボットシステムとその特性	5
2-1. ロボットの分類	5
2-2. ロボットシステムの基本構成	6
2-3. ロボットシステムのネットワーク構成	7
3. セキュリティ検討の流れ	8
3-1. セキュリティ検討の流れ	8
3-2. ロボットシステムにおいて保護されるべき資産	9
3-3. その他の留意事項	11
3-3-1. 物理セキュリティ	11
3-3-2. ユーザーによる誤操作	11
3-3-3. セキュリティと安全性との関係	11
4. 脅威分析とリスク評価	12
4-1. 危惧される脅威事象の洗い出し	12
脅威事象1. なりすまし ロボット制御ののっとり	12
脅威事象2. 改竄 ロボットを制御するためのデータキプログラムが改竄	13
脅威事象3. 情報漏洩	14
脅威事象4. サービス不能攻撃 (DOS攻撃)	14
4-2. 脅威分析・リスク評価手法	15
① ユースケースの整理・洗い出し	15
② ミスユースケースの洗い出し	16
③ アタックツリー	17
④ リスク評価	18
⑤ 対策の検討・優先順位付け、⑥残留リスクの検討、⑦対策の実施	18
4-3. 脅威分析 具体例	19
具体例1: WRS2018 スパイダー	19
具体例2: LICITA 受付・誘導ロボットの例	22
5. 対策のガイドライン	26
5-1. 主な脅威事象の特徴と対策の方向性	26
なりすまし	27
改竄	27
情報漏洩	28

Copyright ©2019 by University of Aizu · TIS Inc. · Net One Systems Co., Ltd. 2

(b) 目次 (抜粋)

Fig 5. サービスロボット・セキュリティガイドライン表紙・目次 (抜粋)

〈2・4〉中長期課題の抽出と関連機関への提言

(2019 年度後半)

サービスロボットのセキュリティの検討や公開したガイドラインへのフィードバックなどから以下のような中長期に検討が必要な技術課題が明らかになった。

・関連分野との相互関連性 (セキュリティとセーフティとの関係性など)

サイバーセキュリティとセーフティ、あるいは物理セキュリティとの相互影響や関係性もサービスロボットにおいては今後重要な事項であり整理・検討が必要である。

IoT 以前は、独立した事象と扱われてきたセキュリティの脅威とセーフティのハザードが、IoT システムでは、相互に影響しあう可能性が出てきた。特にサービスロボットシステムは、日常生活の中で人間と共生して動作するために、サイバー攻撃によって物理的な危害を引き起こす可能性もある。また逆に物理的なシステムへの侵入や情報の盗聴などによってサイバー空間への攻撃の可能性も生まれる。

・ロボットシステムのアーキテクチャ・モデリング

クラウドロボティクスが進行すると、本来ロボット単体が持つとされた機能 (認識、制御、動作) がネットワーク・クラウドを介して分散化される。

セキュリティ脅威の影響を受けにくいロボットシステムのアーキテクチャデザインの指針があると理想的である。また、脅威分析・リスク評価の手法もサービスロボットの特徴に合わせてモデル化・標準化を検討する必要がある。

これらの課題については標準化等を含めて、関連機関と強力で連携して推進する必要があると考え、RRI (ロボット革命・産業 IoT イニシアティブ協議会) の調査検討委員会へ提言を行った。

〈2・5〉セキュリティ攻撃シミュレーション実証実験

(2019 年度後半)

2019 年度後半は、ロボットシステムに内在するセキュリティ上の潜在脅威とリスクを顕在化しその影響を実測する実証実験も実施した。日本アドシス株式会社、株式会社 TIS と会津大学が共同開発した配送ロボットシステムを対象にして、攻撃者がロボットネットワークに侵入し、偽のロボットノードになりすましてロボットノード間の制御情報を傍受し、その内容を書き替えてロボットの動作を狂わせる攻撃のシミュレーションである。通信方式の異なる 2 パターンの攻撃シナリオを実証し、いずれもロボットの実動作への影響が甚大であることが確認された。これらの実証により潜在的なセキュリティ上の脅威を顕在化させると同時に、認証やアクセス制限などのセキュリティ対策の有効性・重要性をあらためて認識することができた。

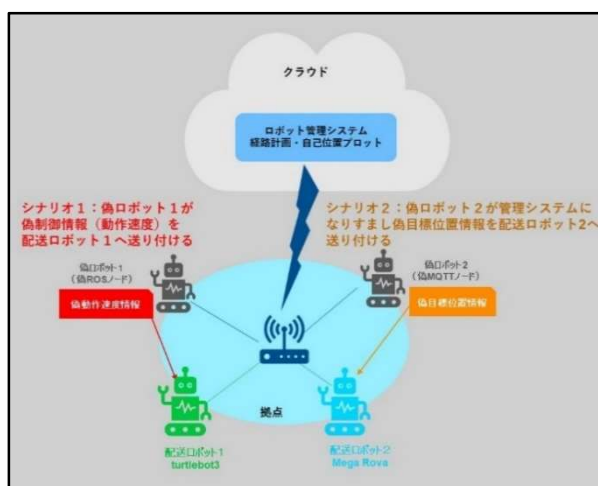


Fig 6. セキュリティ攻撃実証シミュレーション構成図

(実証実験風景公開動画)

シナリオ 1. ROS ノードスプーフィング

https://www.youtube.com/watch?time_continue=5&v=pi9vCxiG9Dg&feature=emb_logo

シナリオ 2. MQTT ノードスプーフィング

https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=ympz992LB1k&feature=emb_logo

〈2・6〉ワークショップの開催と課題抽出（2020 年度）

2020 年度は、本プロジェクト参画企業 5 社（アイザック株式会社、東日本計算センター株式会社、日本アドシス株式会社、アクアクルー株式会社、株式会社会津ラボ）を対象にロボットセキュリティ・ワークショップを開催した。目的は、先行して公開しているサービスロボット・セキュリティガイドラインの内容の浸透、及びガイドラインに沿った実習によりガイドラインの内容を検証し課題を抽出することである。具体的には、各社が開発しているロボットシステムにおける資産の洗い出しと脅威の想定、それに対するセキュリティ対策目標の設定の演習である。結果として、サイバー攻撃から保護する対象は情報資産だけにとどまらず、物理資産やロボットの機能、環境・安全性への影響という側面も考慮に入れる必要があることを改めて認識した。これらの課題は RRI に新たに設置されたロボットセキュリティ調査検討委員会でも主要な検討テーマとして取り上げられている。

〈2・7〉関連活動（2020 年度～）

本研究がきっかけとなって RRI にロボットセキュリティ調査検討委員会が新規に設置されることとなり、筆者が委員長としてロボットセキュリティに関連する共通課題やモデル化の議論を推進している。この成果も近く RRI から刊行される予定である。

また福島県のロボット基盤強化事業に採択された株式会社 TIS による“セキュアなロボットシステム”においても、セキュリティの脅威分析・リスク評価の支援、実証テストの実施を支援した。

3. 産学連携

本研究テーマでは、会津大学がロボットシステムのソフトウェアや制御に関する知見・事例、更には実証環境を提供、ネットワークシステムがサイバーセキュリティ・ネットワーク・IoT に関する知見やノウハウを提供することで、サービスロボット・セキュリティという新たな分野での成果を上げることができた。また、本プロジェクトに参画する企業とも相互に連携し、実証実験やワークショップなどを通じて新たな知見や技術を獲得することができた。

4. 本プロジェクトで習得した技術

ネットワークシステムではサイバーセキュリティや産業用 IoT セキュリティ技術は従来から習得していた。本プロジェクトに参画することによって新たにロボットなどの移動体の IoT セキュリティに関する技術を習得することができた。また、セキュリティを検討する中で、ロボットシステムの機構やロボットミドルウェアに関する技術・知識も習得することができた。

5. 本プロジェクトの成果物

本プロジェクトにおける活動を通じて以下の主要な成果物が生まれている。

- ・サービスロボット・セキュリティガイドライン
- ・セキュリティ攻撃実証実験結果
- ・サービスロボット・セキュリティワークショップ教材・ケーススタディ

6. 事業展開について

本プロジェクトで得られた知見や技術を下記のような事業の中で活かしていく戦略を検討中である。

【基本戦略】

ロボットシステムの運用管理、セキュリティを ICT 技術側面から支援する事業の展開

【短期戦略（1~2 年後）】

ロボットシステムの運用管理・セキュリティを支援するサービスの立ち上げ

【中長期戦略（3~5 年後）】

ロボットシステムの運用管理・セキュリティサービスの統合と共通基盤化

7. 最後に

本プロジェクトへの参画がきっかけでロボット事業分野への関心が弊社でも高まっており、今後も会津大学、福島県と密に連携しながらロボット事業関連分野での企業価値を高めていきたいと考えている。

文 献

-
- (1) 独立行政法人情報処理推進機構, “つながる世界の開発指針 ～安全安心な IoT の実現に向けて開発者に認識してほしい重要ポイント 第2版 “,2017
 - (2) 独立行政法人情報処理推進機構, “IoT 開発におけるセキュリティ設計の手引き” ,2018.
 - (3) IoT 推進コンソーシアム,総務省,経済産業省, ” IoT セキュリティガイドライン Ver1.0” ,2016
 - (4) クラウドセキュリティアライアンスジャパン, ” 「つながる世界」を破壊させないためのセキュアな IoT 製品開発の 13 のステップ “,2017.
 - (5) 独立行政法人情報処理推進機構, “自動車の情報セキュリティへの取組ガイド 第2版” ,2017.
- 著者名: 「タイトル」, 雑誌名, Vol.巻数, No.号数, pp.ページ数 (発行年)
- (6) International Electrotechnical Commission, “IEC61850 Ver2.0”, 2010.
 - (7) International Organization of Standards, “ISO13482”,2014.
 - (8) ロボット革命イニシアティブ, “生活支援ロボット及びロボットシステムの安全性確保に関するガイドライン “,2016
 - (9) 独立行政法人情報処理推進機構, ” 制御システムのセキュリティリスク分析ガイド “第2版 2017
 - (10) 大久保隆夫 情報セキュリティ大学院大学 ” 脅威分析法 組み込みの安全とセキュリティを保証するために” ,2015.

3.9. TIS の取組み

— 自律移動ロボットによる配送業務の自動化を目指して —

TIS 株式会社 松井 暢之 占部 一輝 坂本 諒太
 石橋 靖嗣 油谷 実紀

概要：物流クライシスに直面する我が国において、自律移動ロボットを活用した配送業務の自動化に期待が寄せられている。本稿では、自律移動ロボットをラストワンマイルの配送業務にて利用する上で必要となる「屋内外をシームレスに自律移動するロボット」及び「階層化された地図を用いた経路計画技術」に係る研究開発について報告する。

1. 緒言

少子高齢化を背景に、我が国では生産年齢人口の減少が社会課題となっている^(a)。とりわけラストワンマイルの配送業務では取扱量の急増もあり、労働者の不足と高齢化が深刻化している^(b)。この課題を解決するために様々なアプローチが行われているが、自動走行ロボットを用いたラストワンマイル配送の無人化など、ロボティクスに関する技術を応用した持続的な物流事業を社会実装する試みが着目されている^(c)。

この「自律移動ロボットによる配送業務の自動化」を実現するためには、屋内及び屋外それぞれで利用可能なセンサを組み合わせ、屋内外を問わず「配送業務」を遂行するに足る精度で自己位置を推定する技術^{(d)-(f)}だけでなく、「配送業務」全体として効率の良い経路を立案し、自律移動をロボットに遂行させる技術も欠かせない。加えて「配送業務」を担う複数のロボットを管理下に置き、受発注システムや倉庫管理システムといった「配送業務」を担う様々な外部システムとシームレスに連携してロボットへタスクを割り振る仕組みなど、様々な領域の技術を連携させる必要がある。

そこで本稿では、Stage II において会津大学との共同研究として実施した研究開発のうち、以下2点について報告する。

- ・ 屋内外をシームレスに自律移動するロボットの研究
- ・ 階層化された地図を用いた経路計画技術の研究

2. 屋内外をシームレスに自律移動するロボットの研究（イームズロボティクス株式会社^(d)との共同研究）

屋内外をシームレスに移動するロボットを実現するためには、ある程度の段差を安定して乗り越えられ屋内外をスムーズに行き来できる機体の開発だけでなく、屋内と屋外で異なったセンサを用いて推定された、基本的には互換性の無い座標系でのロボットの位置や方向を矛盾なくシームレスに

連結するソフトウェアの開発も必要となる。そこで本章では、屋内外をシームレスに自律移動するロボットのハードウェア・ソフトウェアのポイントを概観し、開発したロボットが屋内外をシームレスに移動できたのかを確認した実証実験の様相について論ずる。

〈2・1〉ロボットのハードウェア構成

屋内外のシームレスな移動を可能とするために、屋内測位用のLiDARと屋外測位用のネットワーク型RTK-GNSS受信機を搭載したロボットをイームズロボティクス株式会社^(d)と共に開発した（Fig. 1. , Table 1. 参照）。



Fig. 1. 開発した自律移動ロボット

Table 1. 開発したロボットの主要機材

LiDAR	Velodyne VLP-16
ネットワーク型 RTK-GNSS 受信機	Softbank ichimill LC01 (2機)
IMU 内蔵機体制御ボード	Pixhawk CubeBlack
自己位置推定 ROS PC	Intel NUC NUC7i7DNBE
ホイールオドメトリ	infenion TLE5012BE3005XUMA1

本ロボットのハードウェア構成のポイントは、以下の5点である。

- (1) 数 cm 程度の段差であれば乗り越えることができる
- (2) ネットワーク型 RTK-GNSS^{*1}を用いることで、基準局を自分で設置せずとも、世界測地系における現在位置(緯度・経度)を cm 級の精度で推定することができる
- (3) ネットワーク型 RTK-GNSS 受信機を機体の前後軸上に2機搭載し、cm 級精度で緯度・経度を得てお互いの差分を計算することで、ロボット正面の正確な方位を得ることができる
- (4) LiDAR, ネットワーク型 RTK-GNSS 受信機, IMU 内蔵機体制御ボードを旋回中心上に配置することで、超信地旋回する際の自己位置推定の不安定化を抑制することができる
- (5) ネットワーク型 RTK-GNSS 受信機をグランドプレーンの役割を果たす金属板の直上に設置し、地面反射マルチパス信号を抑制することで、ネットワーク型 RTK-GNSS の測位精度が安定するまでに要する時間を短くすることができる⁽⁷⁾

※1 ネットワーク型 RTK-GNSS

GNSS^{**2}や QZSS^{**3}から受信した衛星測位信号をキャリアの移動体通信網から得た補正信号で補正することで、cm 級の高精度な位置測位を行うシステム

※2 全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System)

米国の GPS や EU の Galileo, ロシアの GLONASS, 中国の BDS 等の全地球をカバーする衛星測位システム

※3 準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System)

国内から観測しやすい準天頂軌道を取る人工衛星群を用いた衛星測位システムであり、GNSS の各人工衛星と合わせて日本の測位衛星群を構成している

〈2・2〉ロボットのソフトウェア構成

本研究で開発したロボットは屋内と屋外で異なる観測情報を用いて自己位置を推定するが、それらの切り替えをロボットが自動的・自律的に実行することで、屋内外のシームレスな移動を実現している (Fig. 2. 参照).

本ロボットのソフトウェア構成のポイントは、以下の5点である。

- (1) GNSS や QZSS の信号が受信できない屋内では、IMU が観測したロボットの運動状態と LiDAR が観測した環境状態を元に、事前に作成してある 3 次元点群

地図における相対的な自己位置を推定することができる (Cartographer⁽⁵⁾、⁽⁶⁾の ROS 実装⁽⁹⁾を利用)

- (2) GNSS や QZSS の信号が受信できる屋外では、ホイールオドメトリから得られるロボットの運動状態と衛星の測位信号を元に、世界測地系における絶対的な位置と姿勢を推定することができる
- (3) GNSS や QZSS の信号が受信できかつ 3 次元点群地図も作成されている「のりしろ」領域を定義し、その領域内のある地点で(1)と(2)の座標系を相互変換する行列を導き出すことで、屋内外を問わず同じ絶対的な座標系(緯度・経度・方位)でロボットの自己位置と姿勢を表現できる
- (4) 外部からの指令により、屋内測位と屋外測位を明示的に切り替えることができる
- (5) 屋内外を問わず絶対的な位置・姿勢で目的地点を指定すれば、現在の運動状態と位置・姿勢から目的地点へ到達するための局所的な経路計画をリアルタイムで立案し、左右の後輪を適切に制御してロボットを目的地点まで自律移動させることができる (ArduPilot⁽⁸⁾を利用)

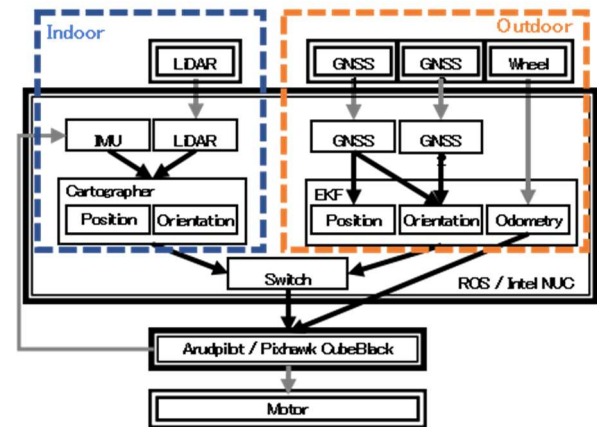


Fig. 2. 開発したロボットのソフトウェア構成

〈2・3〉実証実験 1 とその結果

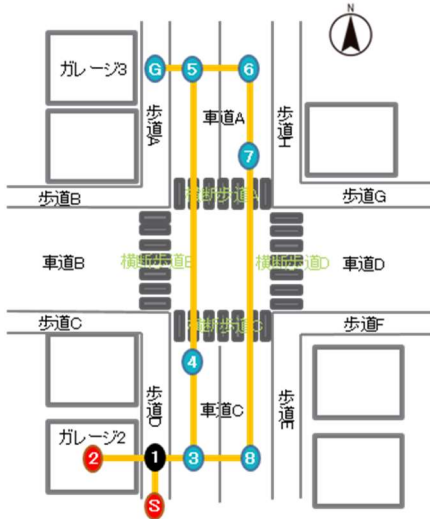
開発したロボットが屋内外をシームレスに移動可能であることを確認するために、福島ロボットテストフィールド⁽⁴⁾にて屋内外を通る 4 パターンの経路を設定し、各経路を正確に自律移動できるか検証した (Fig. 3.~4. , Table 2. 参照).



Fig. 3. 福島ロボットテストフィールド⁽⁴⁾

凡例

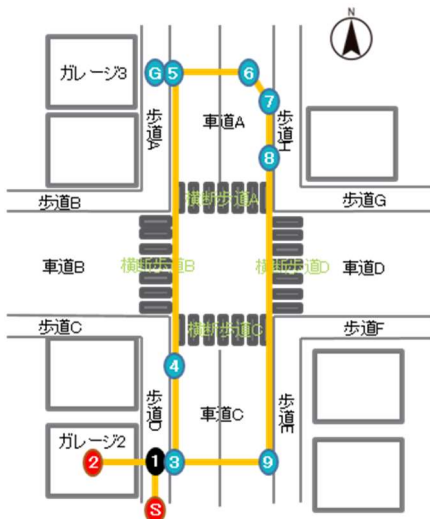
- ⇒ 屋内測位技術による自律移動
- ⇒ 屋外測位技術による自律移動
- ※1 屋外測位から屋内測位へ切替
- ※2 屋内測位から屋外測位へ切替



往路
 S⇒①⇒②⇒①※2⇒③⇒④⇒⑤
 ⇒G

復路
 G⇒⑤⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒③⇒①
 ※1⇒②⇒①⇒S

(a) 車線中央ルート

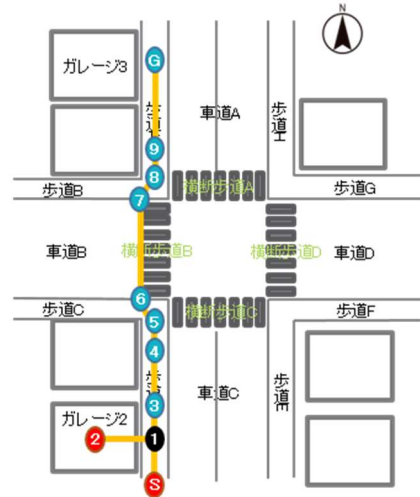


往路
 S⇒①⇒②⇒①※2⇒③⇒④⇒⑤
 ⇒G

復路
 G⇒⑤⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒⑨⇒③⇒①
 ※1⇒②⇒①⇒S

(b) 車線端ルート

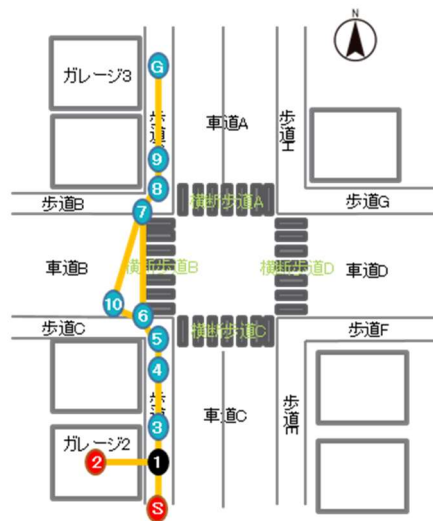
Fig. 4. 実証実験の経路



往路
 S⇒①⇒②⇒①※2⇒③⇒④⇒⑤
 ⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒⑨⇒G

復路
 G⇒⑨⇒⑧⇒⑦⇒⑥⇒⑤⇒④⇒③
 ⇒①※1⇒②⇒①⇒S

(c) 歩道ルート A



往路
 S⇒①⇒②⇒①※2⇒③⇒④⇒⑤
 ⇒⑥⇒⑦⇒⑧⇒⑨⇒G

復路
 G⇒⑨⇒⑧⇒⑦⇒⑩⇒⑤⇒④⇒③
 ⇒①※1⇒②⇒①⇒S

(d) 歩道ルート B

Table 2. 実証実験 1 の概要

実証実験テーマ	屋内外のシームレスな自律移動
実施日時	2021年1月14日～16日
実施場所	福島ロボットテストフィールド ^(b) 市街地フィールド (Fig. 3)
実施内容	Fig. 4に示した経路を走行し、設定した経路を正確に自律移動できることを確認する

検証結果を以下に示す (Table 3. 参照).

Table 3. 実証実験 1 の結果

テストケース	走行経路	走行結果
1	(a) 車道中央ルート	○
2	(b) 車道端ルート	○
3	(a) 車道中央ルート	○
4	(b) 車道端ルート	○
5	(c) 歩道ルート A	×
6	(a) 車道中央ルート	○
7	(b) 車道端ルート	○
8	(d) 歩道ルート B	○
9	(a) 車道中央ルート	○
11	(d) 歩道ルート B	○
12	(a) 車道中央ルート	○
14	(d) 歩道ルート B	○
15	(d) 歩道ルート B	○

テストケース 5 では, Fig. 5. のように歩道ルート A の地点⑤付近にある障害物 (電柱) に衝突しそうになり, テストを中止した. そのため復路の経由地点を⑥から⑩に変更した歩道ルート B を新たに設定し, 以降は歩道ルート B を走行させることで, 歩道ルートのテストケースを完遂させることができた.

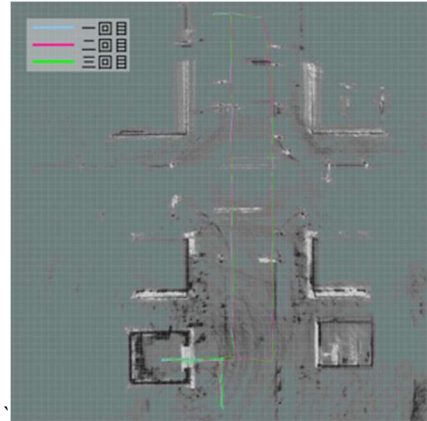


Fig. 5. 歩道ルート A で電柱に衝突しそうになった様子

本検証でロボットが辿った経路 (車道中央ルート, 車道端ルート, 歩道ルート B) の軌跡を以下で示す (Fig. 6. 参照).



(a) 車線中央ルートの軌跡



(b) 車線端ルートの軌跡



(d) 歩道ルート B の軌跡

Fig. 6. 実証実験 1 のロボットの軌跡

Fig. 6. の各グリッドの一边は 1.0m を表しており, (a) 車線中央ルートや (b) 車線端ルートの軌跡を確認する限り, 車道上であれば最大でも目算で 0.5m 程度の誤差で指定した経路をたどれている. 一方各ルートのスタート地点から地点③付近まで, 及び (d) 歩道ルート B の地点⑦からゴール地点まで付近の軌跡を確認する限り, 歩道上の自律移動は車道を移動する場合よりも誤差が大きく, 目算では最大で 1.0m 程度の誤差が発生していることが読み取れる.

〈2・4〉実証実験 1 の考察

屋内測位用の地図と屋外測位用の地図をそれぞれ個別に事前計測し, それぞれの座標系を位置は 10cm 以内, 方向は 1 度以内の精度で変換する行列を事前に作成しておき, 屋内測位と屋外測位の双方が可能な地点でそれらを明示的に切り替えることで, 実際の市街地を模した環境下で, ガレージ内から歩道, 車道と屋内外をシームレスに数 cm 程度の段差を乗り越えて自律移動できることが確認できた.

しかし自律移動走行中に, たどるべき経路に対して移動した経路の誤差が相対的に大きくなる場合があることも判明した. この原因は, 前輪キャスターに対する道路の傾斜の影響が大きいと考えられる. 実証実験 1 で走行した車道はほぼ

平坦（横断勾配 1%程度）に作られているが、歩道にはほぼ平坦な箇所と、車道からの車両乗り入れや横断歩道との接続が可能な 5%程度の縦断勾配を持つ箇所が存在する。開発したロボットは前輪がキャスターになっているため、傾斜面を横断する形で走行すると、車両前端が重力に引かれ進行方向が谷側へとずれる。ロボットはリアルタイムで自己位置を推定し、局所経路を都度修正しながら自律走行するため、完全に経路を外れ谷側に落ちていくことは無いが、平坦な車道上の走行に比べて軌跡の誤差が大きくなることは防げない。(c) 歩道ルート A を走行したテストケース 5 で、障害物に衝突する経路を走行してしまったのも、横断歩道から歩道に乗り上げる際に傾斜がある歩道の擦り付け区間を斜めに横断する経路を指定していたため、走行経路が車道側にずれてしまったためだと考えられる。

〈2・5〉屋内外をシームレスに移動可能なロボットの展望

Stage II で開発した屋内外をシームレスに移動可能な自律移動ロボットは、想定した要件を満たすことができた。しかしハードウェア・ソフトウェアの両面でいくつかの改善ポイントがある。今後も研究を重ね、より良い自律移動ロボットの開発につなげていきたい。

(1) 前輪キャスター

屋外を走行する場合、市街地であってもある程度の段差を乗り越えなければならない⁽⁴⁾。前輪をキャスターにすると、この段差の乗り越えに対して有効である一方、傾斜路を横断する際にたどる経路の誤差が大きくなる原因にもなっている。今後、後輪のモーター出力の向上や出力特性の最適化、及びキャスター取り付け角の変更などを施し、傾斜路を横断する際の影響を小さくできないか研究を重ねたい。

(2) 屋内測位と屋外測位の切り替え

本研究では、屋内測位（LiDAR+Cartographer）と屋外測位（ネットワーク型 RTK-GNSS）の双方が効力を持つある地点（Fig.4. における地点①）で、測位方式の切り替えを行った。この方式は有効に動作し、ロボットのシームレスな屋内外自律移動を実現したが、新たな測位方式で自己位置を正確に推定できるようになるまで、地点①で 10~60 秒程度の停止が必要だった。今後、「のりしろ」領域を移動しながら連続的に測位方式を切り替えられるようにすることで、車両の停止を伴わない測位方式の切り替えができないか研究を進めたい。

(3) ネットワーク型 RTK-GNSS の受信アンテナ

本研究では、磁気コンパスではなく 2 機のネットワーク型 RTK-GNSS 受信機の差分を取ることでロボットの方向を正確に推定した。この方式は有効に動作するが、ネットワーク型 RTK-GNSS サービスを 2 回線契約するのは無駄が多い。今後、ネットワーク型 RTK-GNSS サービスを 1 回線のみ契約し、二つの衛星受信アンテナを接続することで、同様の方向推定ができないか、研究を進めたい。

3. 階層化された地図を用いた経路計画技術の研究（株式会社日本アドシス(j)との共同研究）

ロボットの自律移動機能の実装は、移動する環境に関する事前知識を集約した地図を元に、出発地点と目的地点をつなぐ最適経路を算出する大局的経路探索と、ロボット自身が観測した障害物を回避しながら地図上で指示された経路に沿って滑らかに移動するための並進速度・角速度を算出する局所的経路計画に役割を分けて実装されることが多い⁽⁸⁾⁻⁽¹³⁾。しかしこの自律移動機能に着目して論じられた先行研究は多いが、この機能を有効に働かせるために必要な地図はどのような構造をしているべきかという視点からアプローチした研究は少ない。さらに複数ロボットを統括し、全体として安全かつ効率よくロボットを自律移動させるにはどのような大局的経路を立案すれば良いか、という視点からアプローチされた研究も少ない。

そこで本章では、株式会社日本アドシス[®]と共同で実施した、ロボットが自律移動をするために必要な地図の構造をモデル化し、それらの地図を用いて複数のロボットに対し全体として効率が良く事故のリスクが少ない大局的経路を探索する方法の研究について論じる。

〈3・1〉階層化された地図の構造

ロボットが自律移動するために必要な地図のモデルとして、本稿ではエゴ地図、ソシオ地図、大局経路地図、外部地図という四層に階層化された構造を提案する（Fig. 7. 参照）。

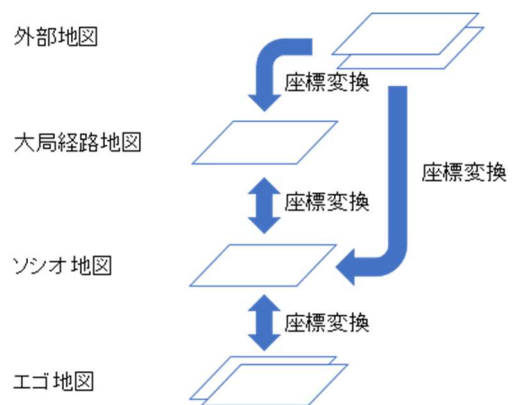


Fig. 7. 四層に階層化された地図の構造

エゴ地図とソシオ地図はロボットにインストールされるメトリックな地図（計量地図）⁽¹⁴⁾であり、ロボットはそれらを用いて自律移動を行う。大局経路地図は管理プラットフォームによって保持されるトポロジカルな地図（グラフ地図）⁽¹⁴⁾であり、大局的な経路計画を算出するために用いられる。最後に、外部システムが持つ位置と対応付けられた経路計画の算出に資する情報（例えばある位置の渋滞情報など）を、外部地図と位置付ける。自律移動ロボットやその管理プラットフォームは、外部地図から情報を引き出し、大局的経路あるいは局所的経路の立案に活用することができる。

〈3・2〉 エゴ地図の役割

最下層のエゴ地図は、ロボットが自身のセンサを用いて自己位置を推定する際に用いる地図である。この地図はロボットが搭載するセンサや実行する自己位置推定技術に依存するため、同じセンサ技術を用いる機種間でしか共有することができない。例えば3次元点群を用いた自己位置推定を行うロボットの場合、三次元 LiDAR によって生成した点群をエゴ地図として用いることができる (Fig. 8. 参照)。

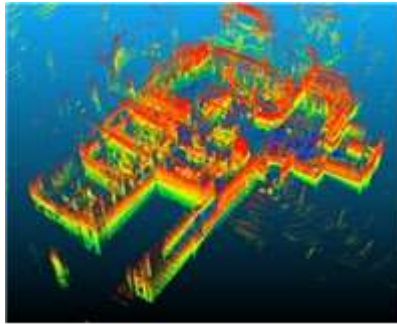


Fig. 8. エゴ地図の例

〈3・3〉 ソシオ地図の役割

第二層のソシオ地図は、自身が認識している自己位置を元に、ロボットが次の経由点まで自律移動するための局所的な経路計画を立案するために用いられる地図である。この際、自身のセンサが作成した自己位置推定用地図 (エゴ地図) を流用することも可能ではあるが、ソシオ地図を明示的に導入することにより、ロボットが搭載するセンサでは観測できない物体も考慮した局所的経路計画を立案することが可能となる。例えば LiDAR を用いて二次元平面を自律移動するロボットの場合、LiDAR で観測できないガラスの壁等を静的に付け加えた二次元点群、さらには他の自律移動ロボットや監視カメラ等が観測した障害物も動的に付け加えた二次元点群をソシオ地図として用いることで、より正確に環境に即した自律移動を実現することが可能となる (Fig. 9. 参照)。

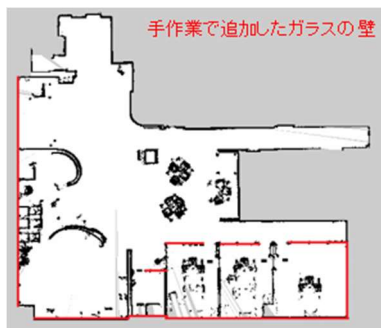
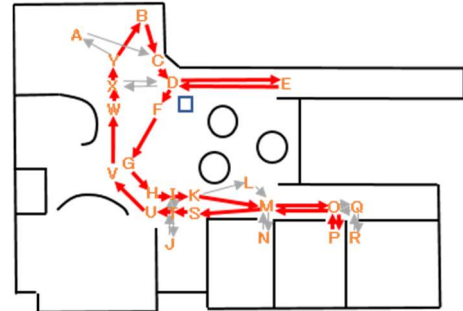


Fig. 9. ソシオ地図の例

〈3・4〉 大局経路地図の役割

第三層の大局経路地図は、ロボットが自律移動する環境において、複数のロボットの大局的な経路計画を制御し、ロボット同士の衝突やデッドロック、無駄な待ち合わせを避け全

体として効率良く業務遂行させるために用いられる地図である。この大局経路地図は、ロボットが自律移動すべき経路をエッジ、各経路の分岐ポイントや自律移動ロボットが転回するポイント、ロボットの目的地等をノードとした有向あるいは無向の連結グラフとして表現される (Fig. 10. 参照)。ロボットが自律移動すべき大局的な経路の立案は、この連結グラフ上において、出発地に相当するノードから、経路すべき地点に相当するノードを通り、目的地に相当するノードへ至る経路のコストを最小化する問題として捉えることができる。



(a) ノードとエッジを手作業で定義した例



(b) ノードとエッジを自動生成した例

Fig. 10. 大局経路地図の例

〈3・5〉 外部地図の役割

最後の外部地図は、システムの管理下にある自律移動ロボットのセンサでは観測しきれない情報を外部システムから得て、大局的あるいは局所的な経路計画の立案時にコストとして算入するために用いられる。外部地図の情報は自律移動ロボットが稼働する環境における位置と対応付けられており、例えば監視カメラの映像から建物内の特定の位置での混雑状況を解析し、空いている経路を予測して指示するような利用方法が考えられる。

〈3・6〉 大局経路地図に関する検討

前節にて示したように、4階層の地図によってロボットの自律移動機能を整理することができるが、本節ではそのうち大局経路地図の生成手法や、複数ロボットの存在下における大局的経路の立案手法について、より深く検討する。

この大局経路地図のグラフを作成する際には、ノードとエ

ッジを手作業で定義することも、何らかのルールで自動的に生成する⁽⁴⁵⁾こともできるが、それぞれメリット・デメリットが存在する。大局経路地図を設定する場所の特性や運用負荷などを考慮して、適切な手法を選択する必要がある。

- (1) ノードとエッジを手作業で設定 (Fig. 10. (a) 参照)
ノードとエッジを手作業で定義することで、ノードの位置や連結すべきエッジをきめ細かく調整することができる。しかし膨大で煩雑な作業が必要となる上に、ロボットが自律移動する環境が変化するとグラフを再び手作業で作成し直す必要があるため、大局経路地図の維持管理コストが増大する。
- (2) ノードとエッジを自動生成 (Fig. 10. (b) 参照)
ルールを定めて大局経路地図を自動生成する場合、グラフの作成・再作成は容易になり大局経路地図の維持管理コストを低減させることができる。(Fig. 10. (b) は、ソシオ地図上の障害物が無い箇所をノードに、8近傍にあるノード間でエッジを引いた大局経路地図の例)。しかしルールが単純な場合、業務上停止してほしい地点にノードが設定されるとは限らず、ルールのチューニングやグラフの手作業による修正など、結局大局経路地図の維持管理に追加コストが必要になる場合がある。

また同一の大局経路地図内で複数のロボットが動作している場合、他のロボットの現在位置や将来存在するであろう位置を考慮してロボットを自律走行させることができれば、全体としてより効率的でロボット同士の接触事故のリスクが少ない経路を立案することができる。この他ロボットの事情を考慮した経路立案には様々な手法が考えられるが、本章では次の二つの手法を提案する。下記以外の手法も含め、大局経路地図を設定する場所の特性を考慮して適切な手法を選択する必要がある。

- (1) 閉塞区間を静的に設定 (Fig. 11. (a) 参照)
一つ目の手法は、狭くてすれ違いができない箇所など、大局経路地図のある誘導部分グラフに(列車運行管理でよく用いられる概念である)閉塞区間を静的に設定するという手法である。その閉塞区間にロボットが存在する場合、誘導部分グラフ内のノードに赤信号が灯され、他のロボットは閉塞区間内に侵入できなくなる。そのため他のロボットは閉塞区間直前のノードで待機するか、閉塞区間を通らない経路を再探索し迂回することになる。よってロボット同士が狭い空間で鉢合わせして接触するリスクや、お互いが道を譲るのを待ってデッドロックするリスクを低減させることができる。
- (2) 閉塞区間を動的に設定 (Fig. 11. (b) 参照)
(1)の閉塞区間を手作業で静的に定義する手法は有効に機能するが、大局経路地図の自動生成とは相性が悪い。そこで他のロボットの現在位置や将来走行

するであろう経路を動的な閉塞区間とみなし、それらを通行不能なエッジとして切断した部分グラフで大局的経路を探索するという手法も考えられる。これによってもロボット同士の接触事故やデッドロックのリスクを低減させることができるが、あるロボットが将来走行するであろう経路を全て閉塞してしまうと、他のロボットが経路を探索する自由度が減ってしまうため、全体として非効率な大局的経路となってしまう可能性がある。

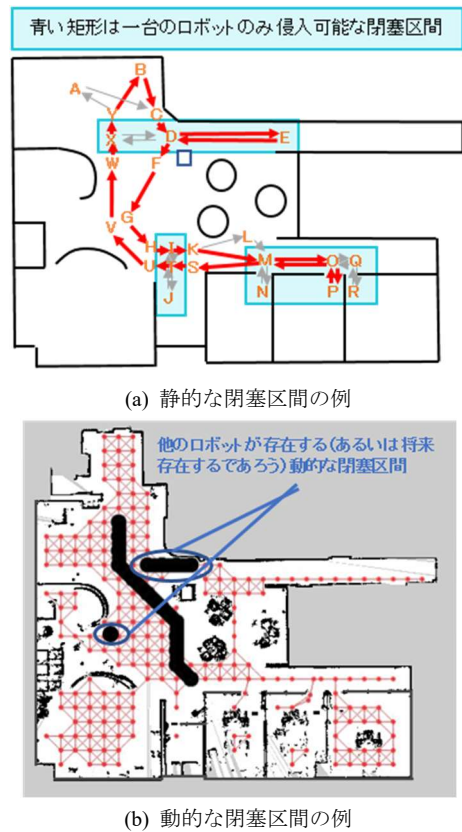


Fig. 11. 大局経路地図上の閉塞区間の設定例

〈3・7〉 実証実験 2 とその結果

複数のロボットに対し全体として効率が良くロボット同士の接触事故のリスクが少ない大局的経路を、大局経路地図を用いて立案できることを確認するために、会津大学 先端 ICT ラボ⁽⁴⁶⁾にて二パターンの大局経路地図に対して検証を行った (Table 4. ~ 5., Fig. 12. ~ 13. 参照)。

Table 4. 実証実験 2 の概要

実証実験テーマ	大局経路地図を用いた全体として効率的でリスクが低い大局的経路の立案
実施日時	2019年11月26日~29日 2020年12月16日~17日
実施場所	会津大学 先端 ICT ラボ ⁽⁴⁶⁾ (Fig. 12.)
実施内容	単体あるいは複数のロボットが動作している状況で、大局経路地図上でロボット (Fig. 13.) が辿るべき大局的経路を探索し、探索された経路をロボットが実際に効率よく事故無く自律移動できることを確認する

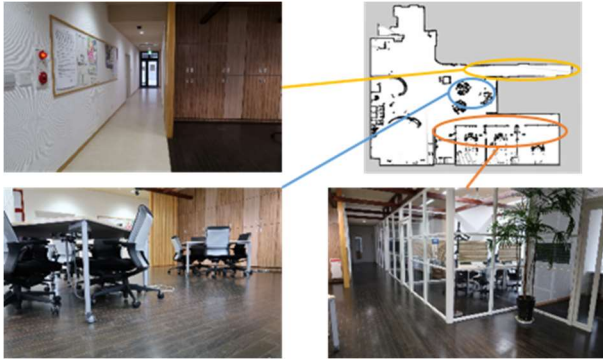


Fig. 12. 実証実験 2 を行った先端 ICT ラボ^(k)の様子

Table 5. 実証実験 2 で用いたロボットの主要機材

(a) Tuttlebot3 Waffle Pi (改)

LiDAR	Velodyne VLP-16
自己位置推定 ROS ボード	BarebonePC (Intel Core i5)
ホイールオドメトリ	Dynamixel XM403-W201-T

(b) Megarover v2 (改)

LiDAR	Velodyne VLP-16
自己位置推定 ROS ボード	BarebonePC (Intel Core i3)
ホイールオドメトリ	独自エンコーダ

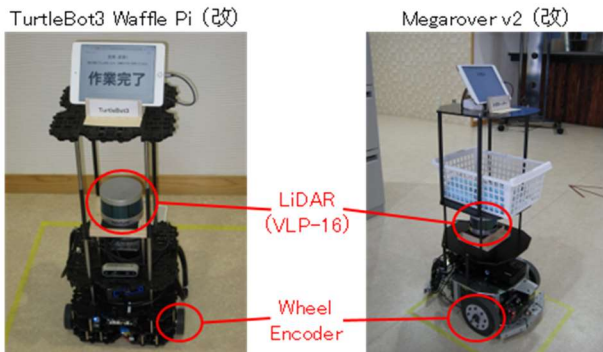


Fig. 13. 実証実験 2 で用いた二種類のロボット

パターン 1 では、ノードとエッジ及び閉塞区間を手作業で静的に設定し、ロボットが通るべき経路も出発地点と経由地点、及び目的地の組み合わせごとに事前に手作業で算出しておく手法で、大局経路地図を定義した。ただし閉塞区間へ侵入できない場合の経路再探索機能は実装できなかった。

パターン 2 では、まずソシオ地図上の障害物が無い箇所格子点を設定し、それらをノードとして 8 近傍にエッジをひいたグラフを事前に自動生成しておいた(ただし業務シナリオに合わせて一部のノードの座標とエッジの接続を手作業で修正した)。そのグラフを元に、他のロボットが現在存在する位置及び現在以降で通行する予定の経路を接続するエッジを全て切断した部分グラフを動的に生成し、その部分グラフに対して A*アルゴリズム⁽¹⁶⁾を用いて最短経路を探索する手法で、大局経路地図を定義した。また閉塞された経路に阻

まれて大局的経路が立案できなかった場合、一定時間待機した後に大局的経路を再探索する機能も実装した。

検証結果を以下に示す (Table 6. 参照)。

Table 6. 実証実験 2 の結果

	ロボット単体での走行		複数ロボットでの走行	
	ケース数	走行結果	ケース数	走行結果
パターン 1	30	○	86	○
パターン 2	30	○	13 ^{**}	○

※ 実験期間の都合上、複数のロボットがすれ違う代表的なケースのみ実施

パターン 1 の静的に設定した大局経路地図を用いた経路探索は想定通りに動作し、ロボットが単体で動作している場合でも、他のロボットが動作している場合でも問題なくロボットは指定された経路を通して目的地に到着した。しかし予備実験では大局経路の設定にミスがあり、Fig. 11. (a) の A→C と Y→B のようにエッジが交差するにも関わらず閉塞指定をしていない箇所が残っていた。そのためその箇所ですれ違いロボット同士がお互いを避けきれずに接触する事故が発生した。これは定義済みの大局経路を修正することで、実証実験 2 では事象が再発しないことを確認した。

パターン 2 の動的に生成した大局経路地図を用いた経路探索も、パターン 1 と同様に想定通りに動作した。パターン 2 では特に、他のロボットの自律移動に伴ってリアルタイムに大局経路地図が更新され、大局的経路が探索できれば待機していた自動的にロボットが移動を開始するという挙動も確認することができた。

〈3・8〉実証実験 2 の考察

パターン 1 は、手作業で閉塞区間を定義していたため、設定ミスがあると事故が発生するリスクがある。複数の経路が考えられる複雑な大局経路地図の場合、閉塞区間の設定に過不足が無いことを目視で確認することは非常に困難だと考えられる。よってグラフ構造の静的なチェックやシミュレーションによる動的なチェックといった、何らかのルールやツールを作成し、機械的なチェックを行うのが望ましい。

またパターン 1 では、閉塞区間が正しく定義されている限りロボット同士の事故リスクを避けられることを確認できた。しかし閉塞区間へ侵入できない場合に経路を再探索する機能が実装されていないため、既に他のロボットが閉塞区間へ侵入している場合、その閉塞区間を回避すれば目的地まで自律移動できる状況であっても、ロボットは閉塞区間直前で待機することしかできなかった。そのためロボットが待機している時間が長く、複数のロボット全体として最適な経路を立案できていないと言いつらい。よって閉塞区間に侵入できない場合に大局的経路を再探索し、可能であれば閉塞区間を回避して自律移動を継続できる機能が必要となるだろう。

一方パターン 2 では、動的に設定した閉塞区間を元に大局的経路を動的に探索しているため、手作業で閉塞区間を設定している場合に発生し得る設定ミスによる事故を未然に防止

することができた。また大局経路地図をリアルタイムに更新することで、他のロボットの状況に従って適切なタイミングで大局的経路が割り当てられることも確認できた。しかし現状のパターン 2 の実装では、他のロボットの現在位置だけでなく将来通るであろう経路も含めすべて閉塞してしまう。そのため事故リスクは少なく安全ではあるが、実際にはまだ他のロボットが来ておらず安全に通行できる状況であってもロボットはその閉塞された経路を回避するため、複数のロボット全体として最適な経路を立案できているとは言いがたい。よって将来通るであろう経路をそのまま全て閉塞してしまうのではなく、他のロボットがその場所へ将来いつ到達するのかも考慮して、より効率的な閉塞を行う必要があるだろう。

〈3・9〉大局経路地図を用いた大局的経路計画の展望

Stage II で研究した 4 階層の地図の構造と、大局経路地図を用いて複数のロボットに対し全体として効率が良くロボット同士の接触事故のリスクが少ない大局的経路を立案する手法は、ある程度は想定した要件を満たすことができた。しかし、より維持運用が容易で、かつ全体としてより効率が良い大局的経路を立案するためには、まだ多くの改善ポイントがある。今後も研究を重ね、より良い大局的経路を立案できるようにしていきたい。

(1) 業務要件に沿ったグラフ構造の自動生成

手作業による運用負荷や設定ミスによる事故のリスクを考えると、大局経路地図のグラフ構造は自動生成の方が良い。しかし実証実験 2 で用いた単純な生成ルールでは、業務要件で必要とする目的地にピンポイントでノードを設定することや、走行すべきでない経路のエッジを適切に削除することができず、グラフ構造の手作業での修正が必要となってしまった。そこで今後は、グラフ構造の自動生成ルールをより精密化するだけでなく、自動生成時に人の業務的な知見も加えられるようにすることで、業務要件に沿った大局経路地図のグラフ構造を運用負荷が少なく自動生成できるように、研究を進化させたい。

(2) 全体として効率的な大局的経路の立案

事故を未然に防ぐことができる大局的経路であることを前提として、さらに複数のロボット全体としてより効率的な大局的経路を立案できる手法を検討したい。例えば待機中のロボットだけでなく移動中のロボットの経路も含めて、大局的経路を全体的に定期的に再探索することによって、全体として効率的な大局的経路へ更新し続けるといった手法が考えられる。また動的な閉塞区間の設定も、他のロボットが将来通るであろう経路を全て閉塞してしまうのではなく、他のロボット及び自分自身の移動速度を考慮に入れ時間軸も踏まえた閉塞の概念を導入することによって、閉塞される区間がより短縮され全体として効率的な大局的経路の立案が可能となるだろう。

4. 結言

本稿では、自律移動ロボットによる配送業務の自動化を実現するために Stage II で実施した以下の研究開発について報告した。

- ・ 屋内外をシームレスに自律移動するロボットの研究
- ・ 階層化された地図を用いた経路計画技術の研究

双方ともに想定した成果が得られ、ロボットによる配送業務の自動化へ一歩近づいたと考えられるが、実際に動作させてみると改善すべきポイントが多々発見されたのも事実である。今後も研究開発を進め、自律移動ロボットによる配送業務の自動化が果たされた社会へと貢献したい。

文 献

- (1) R. Smith and P. Cheeseman, "On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty", *Int. J. on Robotics Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 56-68, (1986)
- (2) F. Lu and E. Millos, "Globally consistent range scan alignment for environment mapping", *Autonomous Robots*, Vol. 4, Issue 4, pp. 333-349, (1997)
- (3) S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, "Probabilistic Robotics", The MIT Press, (2005)
- (4) E. Olson, J. Leonard and S. Teller, "Fast iterative alignment of pose graphs with poor initial estimates", *Proc. of ICRA*, pp. 2262-2269, (2006)
- (5) W. Hess, D. Kohler, H. Rapp, and D. Andor, "Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM", 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1271-1278. (2006)
- (6) 友納正祐, 原祥堯, "SLAM の現状と今後の展望", *システム/制御/情報*, Vol.64, No.2, pp.45-50. (2020)
- (7) 目黒淳一, 竹内栄二郎, 鈴木太郎, "ロボティクスにおける GNSS 失敗学", *日本ロボット学会誌* Vol. 37, No.7, pp.585-592. (2019)
- (8) O. Brock and O. Khatib, "High-Speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 341-346 (1999)
- (9) H. Darweesh, E. Takeuchi, K. Takeda, Y. Ninomiya, A. Sujiwo, L. Y. Morales, N. Akai, T. Tomizawa and S. Kato, "Open Source Integrated Planner for Autonomous Navigation in Highly Dynamic Environments", *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 668-684 (2017)
- (10) P. Marin-Plaza, A. Hussein, D. Martin and A. Escalera, "Global and local path planning study in a ROS-based research platform for autonomous vehicles", *J. of Advanced Transportation* (2018)
- (11) J. Snape, J. van den Berg, S. J. Guy and D. Manocha, "Smooth and collision-free navigation for multiple robots under differential-drive constraints", *Intelligent Robots and Systems*, pp. 18-22 (2010)
- (12) C. Roesmann, W. Feiten, T. Woesch, F. Hoffmann and T. Bertram, "Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots". 7th German Conference on Robotics, pp. 74-79 (2012)

- (13) R. A. Knepper and D. Rus, "Pedestrian-inspired sampling-based multi-robot collision avoidance", The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 94–100 (2012)
- (14) S.Thrun, "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation", Artificial Intelligence, Vol. 99, Issue 1 (1998)
- (15) E. Tsardoulis, K. Iliakopoulou, A. Kargakos and L. Petrou, "A Review of Global Path Planning Methods for Occupancy Grid Maps Regardless of Obstacle Density", J. of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 84, pp. 829-858 (2016)
- (16) P. E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths", IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol. 4, Issue 2 (1968)

オンライン資料

- (a) OECD: 「OECD Data - Working age population.」
<https://data.oecd.org/pop/working-age-population.htm>
 [Accessed February 22, 2021]
- (b) 国土交通省: 「物流を取り巻く動向について 令和 2 年 7 月」
<https://www.mlit.go.jp/common/001354692.pdf>
 [Accessed February 22, 2021]
- (c) 経済産業省: 「自動走行ロボットの社会実装に向けて 令和元年 6 月」
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosoko_robot/index.html
 [Accessed February 22, 2021]
- (d) イームズロボティクス株式会社
<https://eams-robot.co.jp/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (e) Cartographer
<https://google-cartographer.readthedocs.io/en/latest/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (f) Cartographer ROS Integration
<https://google-cartographer-ros.readthedocs.io/en/latest/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (g) ArduPilot
<https://ardupilot.org/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (h) 福島ロボットテストフィールド
<https://www.fipo.or.jp/robot/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (i) 国土交通省: 「歩道の一般的構造に関する基準等について」
<https://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/20050203hodou.pdf>
 [Accessed February 22, 2021]
- (j) 株式会社日本アドシス
<https://www.jadsys.co.jp/>
 [Accessed February 22, 2021]
- (k) 会津大学先端 ICT ラボ
<https://www.lictia.jp/>
 [Accessed February 22, 2021]

4.1. 複数移動ロボットによる搬送サービスの参照モデルの設計

会津大学 成瀬 継太郎

概要：本稿では複数移動ロボットによる搬送サービス問題に対する参照モデルの開発過程を紹介する。まず搬送サービスの分析を行い、システムの機能の定式化を行う。次にシステムを機能分割する基準に対して部分機能間のデータ交換量を最小にすることを導入し、独立性と汎用性が高い参照モデルを開発する。最後にこの参照モデルに従った2つの実装事例を示し、本モデルの汎用性を検証する。

1. はじめに

ロボットによってサービスを実現するシステムを設計することは非常に難しい。まず実空間でロボットを動かすために、センサデータ処理とロボット制御システムが必要である。さらにサービス実現のためにはタスクを分析し、ロボットが行うサービスを定義し、それを管理する情報システムを設計しなければならない。

設計とは、システムが満たすべき全体機能を部分機能の組み合わせに分解することである。設計の難しさは、無数に存在する分解の中から、最適なものを見つけることである。従来、この設計過程は経験的なものと考えられ、設計者に委ねられていた。

しかし、筆者は対象サービスを分析し、システムが具備すべき機能を定式化することで、最適な機能分解が可能であると考えた。本稿では、この設計結果を参照モデルと呼ぶこととし、開発とは参照モデルに具体的な実装を与える過程だと解釈する。

本稿の目的は、複数移動ロボットによる搬送サービス問題に対する参照モデルの開発過程を示すことである。これにより、同じクラスの問題では設計過程が短縮できる。さらに他のクラスの問題でも、本稿の考え方を応用することで、そのクラスの参照モデルの開発が可能になる。

本稿は以下のように構成される。第2節では搬送サービスの分析を行い、システムの機能の定式化を行う。第3節ではシステムを機能分割する基準に、部分機能間のデータ交換量を最小にすることを導入し、汎用性が高い参照モデルを開発する。第4節では、この参照モデルに従った二つのシステム実装の事例を示し、本モデルの汎用性を検証する。第5節で本稿の結論を述べる。

2. 複数移動ロボットによる搬送サービスの分析

はじめに本稿で扱う問題解決過程と設計課題を Fig. 1 に整理する。まず、問題空間 P と初期状態 p と求める解 s が含まれる解空間が与えられる。このとき、与えられた制約 f_j を満たし、かつ目的関数 f_c を最小化する解 s が求めるもので

ある。そして解法 f とは問題空間 P から解空間 S への写像であり、これはアルゴリズムなどで与えられるものとする。

さて、本稿で扱う設計とは、全体解法（あるいはシステムの機能） f を、複数の部分解法 f_i で実現することとする。この分割法は無数に存在するが、ここでは部分解の解空間が小さいものと定める。その理由は、本稿では情報システムとして実装したときのモジュール間の独立性を重要視するからである。部分解空間が大きいことは、モジュール間の通信量が増大し、システムの分散性とロバスト性が低下することを意味する。

本稿での設計理論の特徴はここにあり、これまで主観的に定められていた設計の良さを定量的に表現できるようにした。

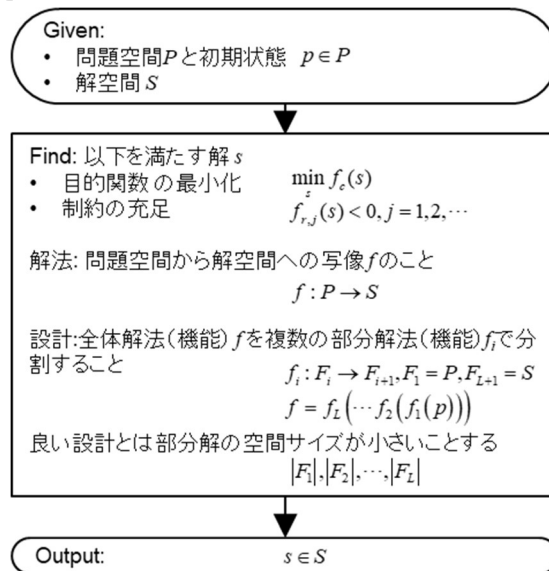


Fig. 1. 問題解決過程と設計課題。

この設計方針に従って、本稿で扱う複数移動ロボットによる搬送問題を以下のように定義する。まず問題として搬送タスク集合 D とそれを実行するロボットの集合 R 、作業環境の地図を表す移動可能な姿勢空間 Q 、およびシステムで共通の時刻 t が与えられるものとする。それぞれを以下のように定義する。

$$D = \{D_k = (q_{d,k}^s, q_{d,k}^g, f_{d,k}), k=1,2,\dots,K\}. \quad (1)$$

$$R = \{R_i = (f_{r,i}), i=1,2,\dots,N\}. \quad (2)$$

$$Q = \left\{ q_j = (x_j, y_j, \theta_j), j=1,2,\dots,M \right\}. \quad (3)$$

$$q_{d,k}^s, q_{d,k}^g \in Q. \quad (4)$$

$$s = (q_{r,i}^t) \in Q^N \times T. \quad (5)$$

ここではロボットは平面を移動することを考え、姿勢 q として x, y 座標と向き θ を持つものとしている。搬送タスク D_k は開始姿勢 $q_{d,k}^s$ と終了姿勢 $q_{d,k}^g$ 、および先行関係や優先順位を表す制約 $f_{d,k}$ の組で、ロボット R_i は付加重量や移動速度を表す制約 $f_{r,i}$ として表現される。

この問題の解 s は N 台の姿勢の時系列であり、制約条件を満たしながら、タスク完了時間といった目的関数を最小化するロボットの移動を実現することである。この過程を Fig. 2 に示す。

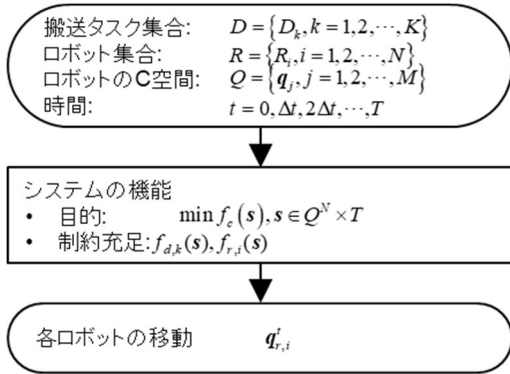


Fig. 2. 複数移動ロボットによる搬送タスク。

3. 複数移動ロボットによる搬送サービスの参照モデルの設計

本節では先に述べたシステムの機能を実現する部分機能分解を考える。問題の入出力関係より、搬送タスクのロボットへの割りあて機能 f_a と、各ロボットに対して各時刻における姿勢を実現する機能 f_p を持つことが必然である。

$$f_a: K \rightarrow I. \quad (6)$$

$$f_p: I \rightarrow Q \times T. \quad (7)$$

$$f_{ap} = f_p(f_a). \quad (8)$$

このとき f_a はロボット R_i が搬送タスク D_k を実行するとき

の所要時間をコストとしたスケジューリング問題を解くことにより求められる。しかし、その所要時間を予想するためには f_p により経路を決めなければならない。実際はこの両者の合成 f_{ap} により評価しなければならない。本稿の目的は参照モデルを作ることであるため、具体的なアルゴリズムには言及しない。

さらに f_p は単一ロボットでは計画と制御の二段階で行われることが多い。実際の作業空間では、地図の変化やロボット側での自己位置推定の不正確さ、外乱によるロボットの動作の不安定性などにより、計画通りにロボットは移動できないため、経路計画器と制御器の間で以下のデータ通信が発生する。経路は姿勢列 $\bar{q}_{r,i}^t$ で表現され、たくさんの姿勢を与えることで細かな経路を表現することができる。一方、制御器は各時刻で自己位置 $\hat{q}_{r,i}^t$ を推定し、それを経路計画器に送信し、ロボット経路の再計画が必要かを判断する。その関係を Fig. 3 に示す。

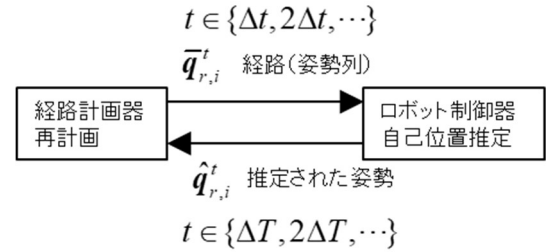


Fig. 3. 複数移動ロボットによる搬送タスク。

この経路計画器と制御器の間に通信が発生することを前提に、複数ロボットにおいてはそれぞれを集中型か分散型のどちらかで管理すべきかを考察した。その結果を Table 1 に示す。

静的環境での経路の最適性と動的環境でのロバスト性、および経路計画と制御の間のデータ交換量を考慮すると、集中型経路計画を分散型のロボットの制御で実現することが最善となる。

この分割に従い、参照モデルを設計した。Fig. 4 にその結果を示す。搬送タスクのロボットへの割りあて f_a と各ロボットに対する各時刻における姿勢の計画 f_p は、それらの中にフィードバックを含むモジュールとして定義した。また経路計画は集中型で行い、経路追従は各ロボットで分散して行うこととした。このロボット制御では、ロボットの自己位置を推定し、それを集中型の経路計画器にフィードバックすることにより、必要に応じて経路の再計画ができる構成になっている。

Table 1. 計画と制御の実装。

	集中型ロボット制御	分散型ロボット制御
集中型 経路計画	静的環境での最適性: A ← ただし Δt : 小 動的環境でのロバスト性: A ← ただし ΔT : 小 (通信量大) のとき C ← ただし ΔT : 大 (通信量小) のとき	静的環境での最適性: A ← ただし Δt : 小 動的環境でのロバスト性: B ← ただし ΔT : 大 (通信量小) のとき 一般的にこのように制御を実装する
分散型 経路計画	静的環境での最適性: C 動的環境でのロバスト性: A-C (利点が無い)	静的環境での最適性: C 動的環境ロバスト性: A (生物型システム)

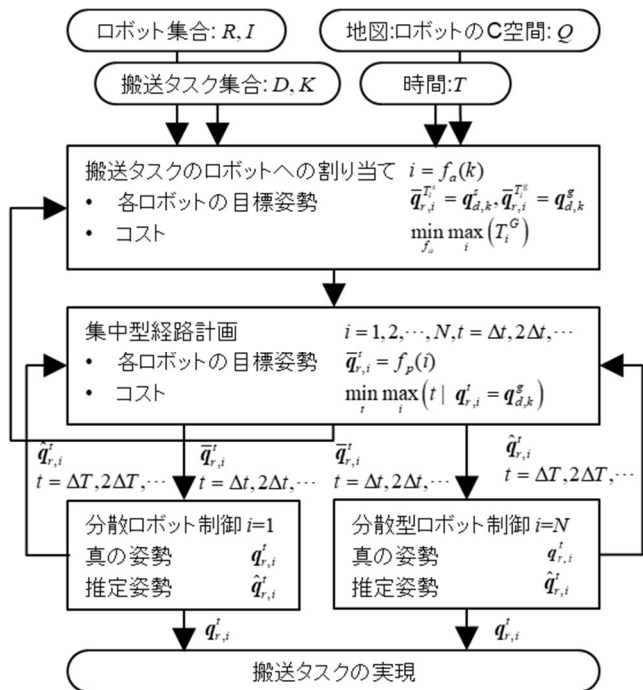


Fig. 4. 設計された複数移動ロボットによる搬送タスクの参照モデル.

この参照モデルは、ロボットやソフトウェアに依存しない抽象モデル、あるいはプラットフォーム独立モデル (Platform Independent Model: PIM) とも呼ばれる。これの各モジュールの実装と、その間のデータモデルを与えることでシステムが実現される。

4. 参照モデルの実装例

前節で定義した参照モデルに対して、本節では屋内複数移動ロボットと屋内外シームレス移動を行う単独ロボットという二つの実装例を示す。それぞれは具体的なソフトウェア実装が必要になるため、これはプラットフォーム依存モデル (Platform Dependent Model: PDM) とも呼ばれる。

この両者は、ロボットに搭載しているセンサと自己位置推定原理も、制御のためのソフトウェアシステムも異なるが、同一の参照モデルに従ってシステムが実装されている。以下、それぞれの詳細を説明する。

〈4・1〉屋内複数ロボットの実装事例

我々のグループで開発した屋内複数ロボットの実装事例を Fig. 5 に示す。前節で開発した参照モデルにおいて、本システムで特有の部分を赤字で示した。また実際のロボットの写真を Fig. 6 に示す。

このシステムでは 2 台のロボットが存在しており、それぞれ独立した PC により ROS と呼ばれるミドルウェアを用いてロボットを制御している。ロボットはセンサに LIDAR を含み、これにより自己位置推定を行っている。

一方、搬送タスクの割り当てと経路計画はインターネット上の別の計算機に FIWARE と呼ばれるフレームワークの中で実装されている。ここで計画された各ロボットの経路がウェイポイント列として表現され、各ロボットにインターネット通信を利用して送信される。各ロボットはそのウェイポイント列を ROS の Costmap2D という形式に変換して制御を行う。そしてロボットが推定した自己位置はインターネット通信で経路計画に送られる。このように参照モデルに対して実装を与えている。

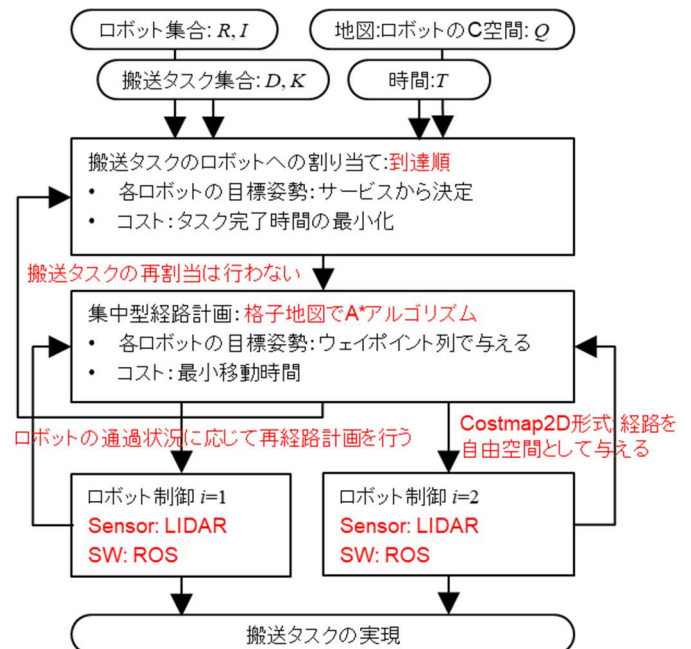


Fig. 5. 屋内複数移動ロボットの実装モデル.



Fig. 6. 屋内複数移動ロボットの外見.

〈4・2〉屋内外単一ロボットの実装事例

屋内と屋外をシームレスに移動できるように、屋内では LIDAR を使って、屋外では GNSS を使ってナビゲーションするロボットシステムの事例を示す。開発された実装モデルを Fig. 7 に、ロボットの写真を Fig. 8 に示す。

このシステムではロボットは一台しか存在しないため、経路計画は単純となる。しかし、屋外では歩道のように移動できる領域が定められているため、自由空間から経路を選ぶのではなく、事前に定められた参照点を経由して経路を

表現することになる。そのため屋内ロボットとは異なり、ロボットはウェイポイント系列を受信し、それらを通過するようにロボット制御する必要がある。これらの機能はインターネット上の計算機で FIWARE というミドルウェアで実装されている。

一方で、ロボットの制御は屋内と屋外に応じて LIDAR と GNSS という異なる 2 系統の制御を切り替える構造で実現されている。

屋内用のシステムは、センサとして LIDAR を用いており、自己位置推定は事前に定めた座標系におけるメートル単位で表現された地図上の座標として表現される。そして ROS というミドルウェアで実装されている。

一方、屋外では GNSS センサを用いるため、地図も地点も緯度と経度で表現される。そしてこちらは Ardupilot と呼ばれるミドルウェアで実装されている。

本システムではこの二種類の制御方式を切り替えて実行するため、二種類の地図の対応関係の保持も必要となる。

5. おわりに

本稿の目的は、複数移動ロボットによる搬送サービス問題に対する本質的なシステム設計を表現する参照モデルを開発することであった。そのためまず搬送サービスの分析を行い、システムの機能の定式化を行った。次にシステムを機能分割する基準に、部分機能間のデータ交換量を最小にすることを導入し、汎用性が高い参照モデルを開発した。そして、この参照モデルに従った二つのシステム実装の事例を示し、本モデルの汎用性を検証した。

これら二つの実装事例は、ロボットのナビゲーションという共通の目的に対して、異なるロボット構造とミドルウェアで実装しているが、共通の参照モデルに従って設計されている。そのため、モジュール単位での部品の共通化や分散開発が可能になるため、システム開発における QCD の向上が期待される。我々は今後、この参照モデルを公開し、さらに良いものにする 것과普及を目指して活動していく。

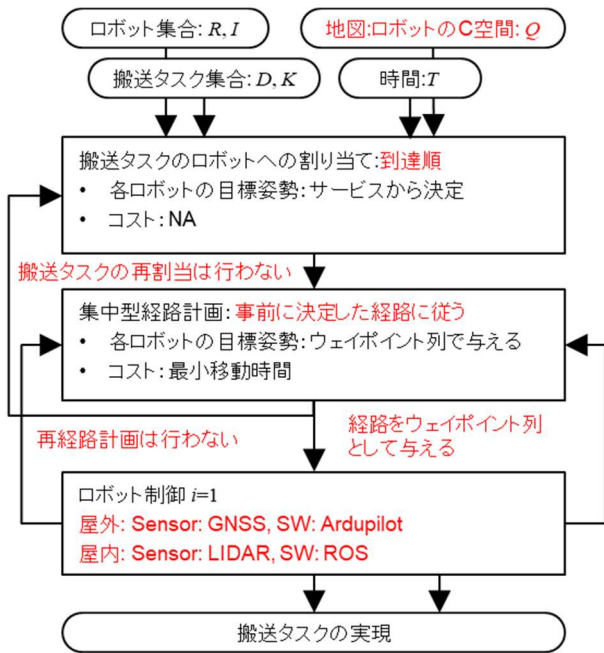


Fig. 7. 屋内外シームレス単一移動ロボットの実装モデル.



Fig. 8. 屋内外シームレス単一移動ロボットの外見.

4.2. クラウドロボティクスにおけるロボットデータレポジトリとデータ収集フレームワーク

会津大学 渡部 有隆

概要：クラウドロボティクス環境では、より安全でスマートなロボットを運用するために、ロボットや異種デバイスからデータを収集する仕組みが不可欠である。産学連携ロボット研究開発支援事業のステージ II では、クラウドロボティクスとロボットデータレポジトリ(RDR)の開発を推進してきた。RDR の研究開発には、そのアーキテクチャの設計や実証実験が欠かせない。一方、RDR を活用するロボットシステムの開発には多くの部品と工程が必要になる。そこで本プロジェクトでは、ソフトウェア工学の観点から、データ収集システムを構築するためのフレームワークのアーキテクチャを提案し、そのプロトタイプを実装した。本フレームワークにより、開発者はオントロジーによりオブジェクトや関連性を定義することで、データ収集コンポーネント群を自動生成することができる。さらに、フレームワークは生成されたコンポーネントに対応するリポジトリをクラウド側に自動生成・配備する。提案されたフレームワークを応用する事例研究も実施した。

1. はじめに

産学ロボット技術開発支援事業のステージ I では、ロボットソフトウェアの標準化を目指し、異種コンポーネントに共通の通信インタフェースを提供するミドルウェアを推進した。さらに、OpenRTM [1-2]に準拠するソフトウェアコンポーネントのライブラリを構築した[3-4]。これまでに、計 139 のコンポーネントが開発され、約 10 の企業や組織によって管理されている。例えば、クローラー、マニピュレーター、コントローラ等の機械装置、カメラ、レーダー、ジャイロ、加速器、測定装置等のセンサー、画像処理や地図生成等のアルゴリズムに関するコンポーネントが利用可能となっている。産学連携ロボット研究開発支援事業のステージ II では、本ライブラリの拡張を進めるとともに、これらのコンポーネントをネットワークで連携するクラウドロボティクス構想を推進してきた[5-6]。クラウドロボティクスでは、制御装置やセンサー等の様々なソースからデータが収集され、ロボットデータレポジトリ(RDR)に蓄積される。これらはロボットシステムをよりスマートにするために、オンライン・オフラインで様々な目的のために活用される。例えば、データ収集用のコンポーネントとして DBRTC が開発され活用されている[7]。

ロボットシステムの知性、安全性、信頼性はデータの質と量の両方に依存するため、RDR は利用可能なソースから有用な情報資源を徹底的に収集する。しかし異種ロボットから不規則に収集された生データは混沌としており、効果的な検索や二次利用には向かない。そこで、RDR では多段階データベースを通して、データを変換し整理する。研究開発の側面では、RDR を含むクラウドロボティクスのアーキテクチャやデータ形式を模索する実証実験が欠かせない。実証実験の意義は現場での応用に留まらず、提案されるリファレンスアーキテクチャやデータ形

式により、第三者が同様のシステムを開発することを支援する。

一方、本プロジェクトではソフトウェア工学により、開発者を支援することを目指している。RDR を活用するロボットシステムを第三者がゼロから構築するには、多くの部品と開発工程が必要になる。これらの工程には、採用されている技術と互換性のあるコンポーネントの開発、データベーススキーマの設計、およびサーバ側での API の実装、リポジトリとサービスの配備が含まれる。さらに、データ収集・活用コンポーネントはライブラリに蓄積されたソフトウェア資産と連携できることが望ましい。つまり、RDR と連携するコンポーネントは、当該プロジェクトで採用されている技術やソフトウェア資産の可用性を考慮すべきである。また、同じプロジェクト内であっても、開発者はシナリオや実験ごとにシステムを構築する必要があり、コンポーネントと対応するスキーマに基づくレポジトリも都度作成しなければならない。

上記の課題を念頭に置き、本プロジェクトではデータ収集システムを構築するためのフレームワーク[8]のアーキテクチャを提案し、そのプロトタイプを実装した。本フレームワークは、開発者がシナリオを定義することで、必要なコンポーネント、サービス、レポジトリを自動で生成し配備することを目指している。産学連携ロボット研究開発支援事業のステージ II における成果は以下の通りである。

- シナリオを基に、上記必要な要素を自動生成・配備するためのソフトウェアアーキテクチャを提案した。
- 既存技術を活用し、提案したアーキテクチャに基づくフレームワークのプロトタイプを開発した。
- 本フレームワークが、必要なコンポーネント、サービス、リポジトリをシームレスに自動生成することを実証するために、いくつかの事例研究を行った。

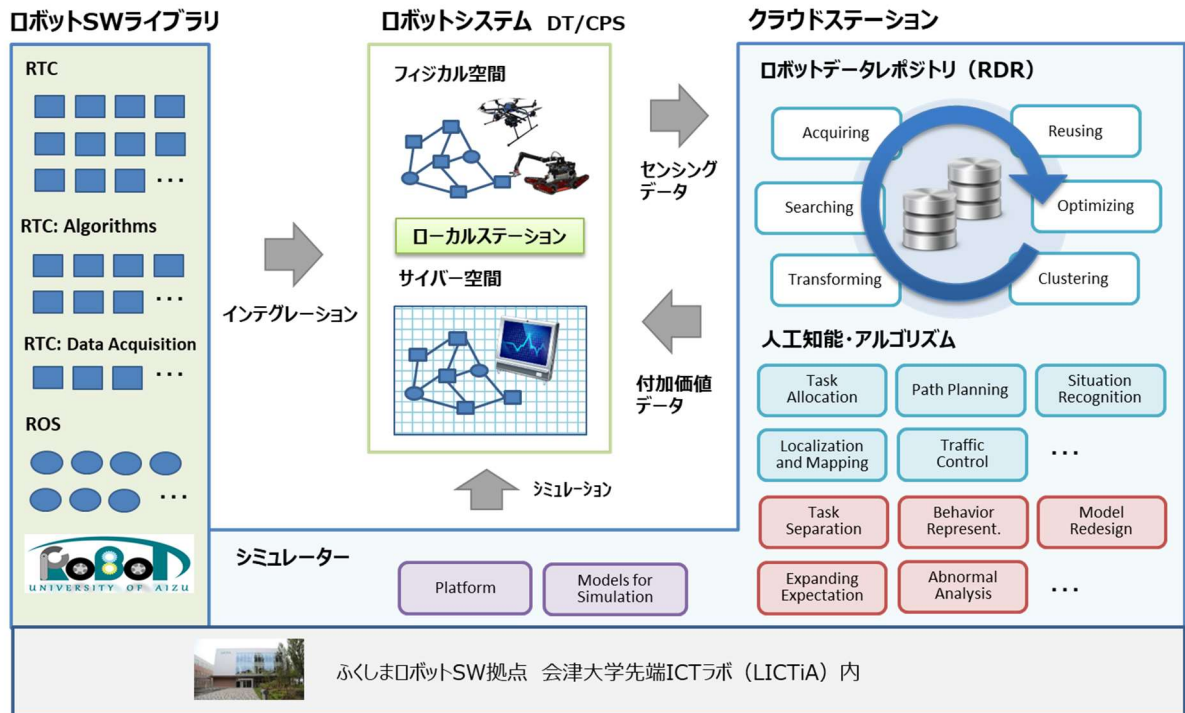


Fig. 1. Concept of the Cloud Robotics

2. クラウドロボティクスとロボットデータレポジトリ

Fig. 1 は本事業が構想する、クラウドロボティクスの概念を示す。ローカステーションは、人間と機械の両方の意思決定プロセスに基づき、ロボットを遠隔操作し、モニタリングする場である。また、関連データと最適な指示を取得するために、クラウドステーションに接続する。オペレーターが仮想環境を介して操作や訓練を行うことができるシミュレーターも、Digital Twin (DT)や Cyber-Physical System (CPS)の観点で重要な役割を果たす。

クラウドステーションはロボットシステムの頭脳であり、リアルタイム処理とオフライン解析の両面を支援する。RDRは、収集、抽出、クリーニング、統合、検索等の様々な操作を想定するデータレイク概念に基づいている。クラウドロボティクス環境では異種デバイスが稼働するため、データの発生場所、時間、頻度、パタンおよびそれらの精度は不規則である。データの属性が事前に定義されていることを前提とするリレーショナルデータベースの一枚岩で、このようなデータを管理することは困難である。そこで、RDR内のデータは多段データベースを通して変換され管理される。

1次データベースは、「現状のまま」の非構造化(半構造化)データを収集する。非構造化データは本質的な生データであり、各レコードはオブジェクトとして表される。非構造化データレポジトリは、様々なデータ型とサイズのデータを不規則な間隔で受信し、肥大化する。このような特徴を考慮し、1次データベースはキーバリューストアにより非構造化デ

ータを管理する NoSQL 技術を備えた、オブジェクト指向データベースで実装される。

一方、2次以降のデータベースは中間データを含む多段データベースで構成する。ローレベルな操作として、ノイズ除去、補間、統合、およびその他の変換操作が実行され、生データがクリーンアップされる。よりハイレベルな操作として、各種アルゴリズムで実装された AI エンジン、変換機、解析器等が稼働する。これらは、リポジトリ内のデータを利用・学習し、新たなモデルをリポジトリに還元し、ロボットシステムに付加価値を提供する。これらの、データのクリーニング、構造化、拡張の目的は、システムの要求に応じて有用な情報資源を迅速に提供することである。従って、2次以降のデータベースは、様々な検索操作作用に事前定義されたフィールドを持つリレーショナルデータベースで実装される。

高品質なロボットシステムを低コストで迅速に開発する、システムインテグレーションの観点からは、共通のインタフェースを備えた再利用可能なレガシーコンポーネントが重要な役割を果たす。そこで、クラウドステーションと通信するデータ収集用のソフトウェアコンポーネントは、コンポーネントライブラリのメンバーとして実装されるべきである。そこで、本フレームワークでは、レガシーコンポーネントとデータ収集コンポーネントは、再利用性と相互運用性が維持されるように共存させる。システムの配備に関しては、データ収集コンポーネントがロボットシステムに含まれている場合、対応するリポジトリと API をクラウドステーションに配備しサービスを運用する。

3. アーキテクチャとフレームワーク

〈3.1〉開発と展開のプロセス

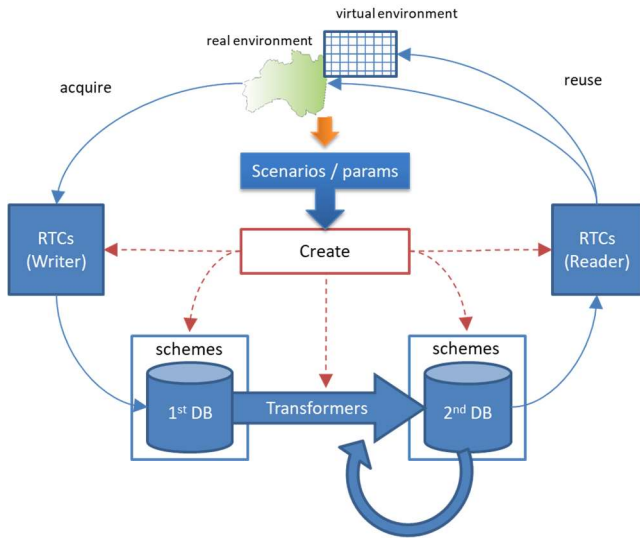


Fig. 2. Development by different scenarios

ロボットプロジェクトでは、目的に応じて、データ活用を含む様々なシナリオが想定される。DTやCPSの観点から、多くの場合ロボットシステムは物理環境と仮想空間で実装・運用される。Fig. 2に示すように、開発者（システムインテグレーター）はシナリオごとに必要なデータ収集コンポーネントと関連する部品を作成する必要がある。従って、我々はソフトウェア工学の観点から、必要な部品やサービスの開発を支援し、以下のような開発者にとって負担となるタスクを軽減する仕組みを提供すべきである。

- 多段データベースの各ステージのスキーマを定義する。
- 1次データベースのデータを再編成し、2次以降のデータベースへ変換する変換機を実装する。
- 当該ロボットシステムに統合された他のコンポーネントと互換性があり、定義されたデータに対応するデータ収集コンポーネントを実装する。
- コントローラ（コンポーネントとリポジトリの間のブリッジ）、サービス（変換機など）、レポジトリ等を、クラウドステーション上に配備しアクティブ化する。

〈3.2〉アーキテクチャ

データ収集コンポーネントと関連部品を作成するために開発者が唯一すべき作業は、想定するシナリオで扱うデータを定義することである。従って、フレームワークの目的は、開発者に対して、ロボットシステムで扱うデータを統一された形式で定義できる方法を提供し、関連部品の生成を自動化することである。

本フレームワークのアーキテクチャは複数の層で編成され、各層は最新の技術を応用し実装することができる。Fig. 3

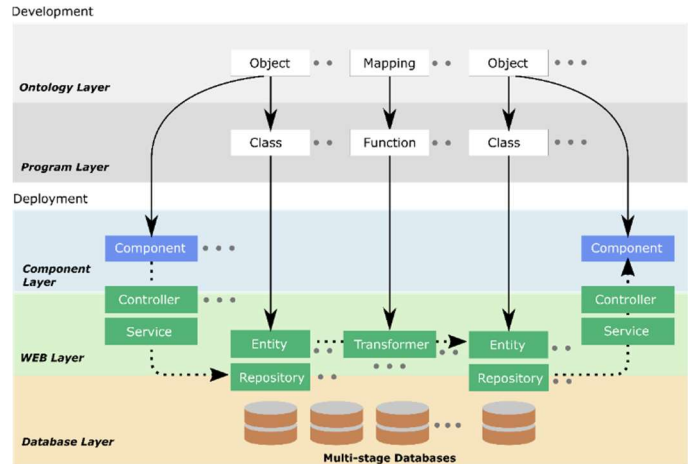


Fig. 3. Architecture of the framework

は提案されたアーキテクチャの概要を示す。このアーキテクチャは1) オントロジー層、2) プログラム層、3) コンポーネント層、4) WEB層、5) データベース層の5つの層を通じて自動化プロセスを実現する。図中の実線矢印は自動生成、点線矢印は運用時のデータの流れを示す。上位2層は、システムインテグレーターの活動に関連し、下位3層は、実行可能なコンポーネントやサービスの自動生成と配備に関連する。

オントロジー層は、データとその関係を定義するユーザインタフェースを提供する。この層は、非専門家を含む様々なグループの開発者をサポートし、人間が指定した知識を機械可読形式に変換する機能を持つ。ロボットが共有する知識は、知識表現用の言語であるOWL[9]で定義する。OWLは、XML標準によりオブジェクトを定義するため、特定の技術（プログラミング言語など）に依存することなく、データを定義することができる。オントロジーには、Objectに加えてそれらの間の関係（Mapping）が含まれる。オントロジーはプロジェクト全体で事前に定義され、シナリオに応じて必要なObjectとMappingのサブセットを選択することで、下位層の入力とすることができる。

プログラム層は、オントロジーで定義された知識と、最下層で生成されるコンポーネントの中間コードを扱う。オントロジー層において、シナリオに関する一連のオブジェクトと関係が選択された後、必要なプログラムが生成される。プログラムには、ClassとFunctionの2種類がある。Classは、オントロジー層で定義されたオブジェクトを表し、Functionは、オブジェクト間のマッピングに基づき、あるオブジェクトを別のオブジェクトに変換する変換関数である。一方この層は、プログラマがプログラミング言語を使用してClassとFunctionを直接定義する機会も提供する。このオプションは、高度な変換プロセスを定義する必要がある場合や、AIエンジン等を利用可能なライブラリと統合する場合においてプログラマを支援する。

コンポーネント層では、上位層で生成された Object や Class に基づいて、ローカルロボットシステムと互換性のある Component が生成される。書き込み専用の Component は、接続されたコンポーネントからデータを受信し、それを RDR に送信する。一方、読み取り専用の Component は、接続されている他のコンポーネントからの要求に応じて RDR からデータを提供する。

Web 層は、ローカルシステムのコンポーネントとクラウド上の RDR との間の API を提供する。オントロジー層とプログラム層のオブジェクトを基に、一連の Controller, Service, および Entity が Web 層に生成される。Entity はデータを表すモデルであり、付随する Repository には、対応するデータベースと互換性のある操作が実装される。Transformer は、あるデータベースのレコードを別のデータベースのレコードに変換するために定期的に行われるサービスである。Transformer は上層で定義された要素に基づいて自動生成される。Controller は、付随するサービスを通じて、クライアント側のコンポーネントとクラウド側のデータベースの間を橋渡しする。

データベース層は、すべてのデータが管理される RDR の中核である。データベースには、Entity と Repository に基づくテーブルが生成される。書き込み専用 Component からのデータは、対応する Repository を介して 1 次データベースに蓄積される。一方、Transformer は、2 次データベースのレコードを生成および更新する。2 次以降のデータベースの対応する Repository を介して読み取り専用 Component にデータが提供される。

〈3.3〉 フレームワーク

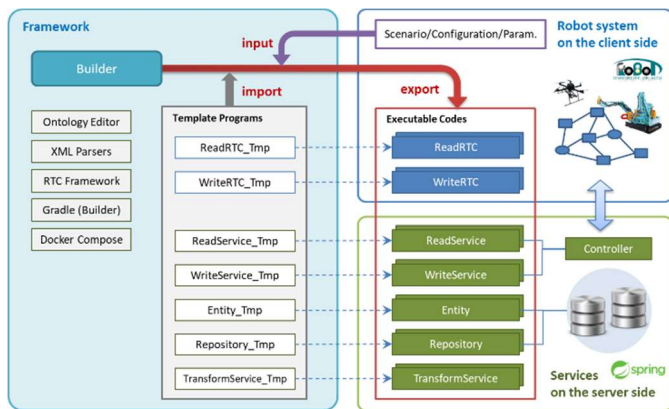


Fig. 4 Overview of the Framework

本アーキテクチャは、様々なテクノロジーと既存のツールを統合することで実装できる理論的概念である。本プロジェクトでは、OpenRTM-aist と互換性のある、Python の RTC を生成するフレームワークをプロトタイプとして実装した。Fig. 4 は、フレームワークの概要を示す。フレームワークには、シナリオ定義から必要な実行可能コードをエクスポート

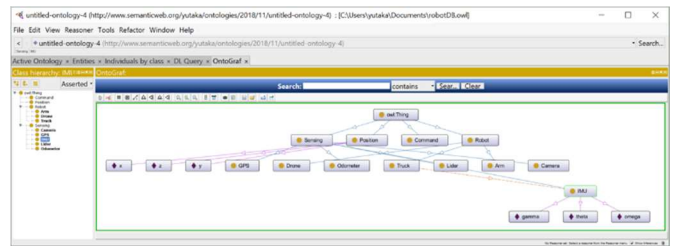


Fig. 5 Example of the ontology

するビルダーが含まれている。ビルダーは、RTC、サービス、エンティティ、レポジトリ、およびコントローラーに関連する一連のテンプレートプログラムをインポートする。

オントロジー層では、開発者は OWL と互換性のある既存のオントロジーエディタを使用できる (Fig. 5)。本プロトタイプでは、Protege [10] を採用した。このエディタは、オブジェクトとそれらの階層構成・関係を定義することができる GUI を提供する。Protege からエクスポートされた XML 標準形式のオントロジーが下位層の入力となる。

プログラム層では、XML 形式のオントロジーから Class と Function に関連する Java のクラスを自動生成する。開発者はオントロジー定義をスキップすることにより、そのようなクラスを自ら作成することもできる。

コンポーネント層では、上層で定義されたデータに基づく RTC が生成される。RTC は、対応するデータフィールド (属性) にデータポートを提供する。書き込み専用 RTC は、POST 操作を介してポートに到着したデータをクラウドステーションに送信する。一方、読み込み RTC は、GET 操作を介してクラウドステーションからデータを取得する。

WEB 層では、本フレームワークは Spring [11] を採用して RESTful API を提供する。この層では、Class と Function のクラスが、それぞれ Entity と Service のクラスに変換される。Spring フレームワークは、Entity クラスから Repository を自動的に生成するメカニズムを提供する。

データベース層では、1 次データベース用に MongoDB が配備され、2 次以降のデータベース用に PostgreSQL のテーブル群が生成される。

実装されたフレームワークは、必要な部品の自動生成だけでなく、それらの配備も支援する。必要なコントローラーやサービスはクラウドステーション上でアクティブ化され、外部からのリクエストに対処する。変換機に関するサービスは、多段データベースの間でデータ変換を行うために定期的に行われる。

4. 事例研究

事例研究は、ロボットシステムとクラウドステーションに必要な要素が、本フレームワークによってシームレスに自動生成・配備される仕組みに重点を置く。そこで、2 つの単純なアドホックアプリケーションを通じて、提案されたアーキテクチャとフレームワークの生産性、可用性、持続可能性、

拡張性、および透明性を実証した[12].

1つ目の事例研究では、オントロジーのデータ定義から必要なコンポーネントを自動生成することに焦点を当てた。この事例研究では、ロボットが緯度/経度の秒形式で位置を継続的に生成し、別のロボット（またはステーション）が緯度/経度の度形式（DEG）で情報を断続的に再利用する環境を構築した。このシナリオでは、2つのオブジェクト PositionInSecond と PositionInDEG、これらのオブジェクト間の変換を表す関連 SecondToDEG がオントロジーで定義された。

2つ目の事例研究では、プログラム層の定義からの自動生成、ライブラリ内のレガシーコンポーネントの再利用、およびクラウドステーションを介した異なるロボット間の連携、に焦点をあてた。具体的には、1台目の EV3 がそのセンサを用いてフィールドを辿り、2台目の、センサを搭載しない EV3 がその軌道を追従するシナリオを想定し、必要なコンポーネントとサービスを、本フレームワークで生成した。この事例研究では、本事業で開発されたいくつかの RTC をライブラリから再利用し、レガシーコンポーネントと互換性のあるソフトウェアコンポーネントを生成したことを実証した。

5. おわりに

本節では、産学連携ロボット研究開発支援事業のステージ II で渡部が担当した内容について紹介をした。このプロジェクトでは、クラウドロボティクスにおけるデータ収集フレームワークのプロトタイプを実装し、その基となるアーキテクチャを提案した。本フレームワークにより、システムインテグレータは、再利用可能なレガシーソフトウェアコンポーネントのライブラリと、クラウド上のロボットデータリポジトリ（RDR）にアクセスする特別なデータ収集コンポーネントを連携させ、ロボットシステムを構築できる。これらのリポジトリは、非構造化データと構造化データの間のデータ操作を可能にするために、多段データベースとして編成される。本フレームワークは、必要な実行可能コードを自動的に生成することにより、関連するソフトウェアパーツ、スキーマ、オブジェクトの開発や、設定や運用に関する多くの工程を簡略化する。その結果、本フレームワークは、データ収集に積極的に関与するロボットシステムを開発する際の生産性を向上させるだけでなく、異なるシナリオごとに繰り返し実施される実験を支援する。さらに、フレームワークが、データ定義からシームレスに必要な要素を自動生成し配備することを実証するために、2つのシンプルな事例研究を行った。

一方、ステージ II で実装したフレームワークはプロトタイプのひとつであり、以下の今後の課題を検討していく中で、アーキテクチャの拡張とより実用的なフレームワークの公開を目指す。

- 今期の開発では、フレームワークによるシームレスな自動生成に焦点を当てたため、クラウド・ローカル間の通信プロトコルは http で簡素化した。IoT 指向でよりセキュアかつ実用的な通信プロトコルの開発成果との統合を試みたい [12-15] .
- より実用的で規模の大きいシナリオを想定し、事例研究を実施する。
- ロボットソフトウェア工学の観点から、RDR と連携したロボットをより柔軟に開発・運用するための Robot Ontology Repository の構想を模索する [15].

文 献

- (1) OpenRTM-aist, <https://www.openrtm.org/openrtm/>
- (2) OpenRTM, <https://github.com/OpenRTM>
- (3) RTC-Library-FUKUSHIMA, <https://rtc-fukushima.jp/>
- (4) Watanobe, Y., Nakamura, K., Yaguchi, Y., Naruse, K., Hiruta, S. RTC-Library-FUKUSHIMA: The Software Component Library to Support Robot Technology Development, 2018 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers.
- (5) Chen, W., Yaguchi, Y., Naruse, K., Watanobe, Y. and Nakamura, K. (2018) 'QoS-aware Robotic Streaming Workflow Allocation in Cloud Robotics Systems', IEEE Transactions on Services Computing, DOI: 10.1109/TSC.2018.2803826
- (6) Chen, W., Yaguchi, Y., Naruse, K., Watanobe, Y., Nakamura, K. and Ogawa, J. (2018) 'A Study of Robotic Cooperation in Cloud Robotics: Architecture and Challenges', IEEE Access, Vol. 6, pp.36662-36682.
- (7) DBRTC Tool Set, URL: <https://rtc-fukushima.jp/technical/2569/>, (Last Access 2021.02.09)
- (8) Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Miyaji, T., Yamada, R., Naruse, K., 'Data Acquisition Framework for Cloud Robotics', 2019 IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), pp.1-7.
- (9) OWL Web Ontology Language, <https://www.w3.org/TR/owl-features/>
- (10) Protege, <https://protege.stanford.edu/>
- (11) Spring, <https://spring.io>
- (12) Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Nakamura, K., Miyaji, T., Yamada, R., Naruse, K., 'Architecture and Framework of Data Acquisition System for Cloud Robotics', International Journal of Information Technology, Communications and Convergence, 2020 (Accepted).
- (13) Yoshino, D., Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Nakamura, K. and Anma, K. (2017) 'Application possibility of OpenRTM-aist-based integrated robot systems using CORBA interfaces and brokered Pub/Sub messaging interfaces', The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec) 2017(0), 2A2-J08.
- (14) Yoshino, D., Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Nakamura, K., Ogawa, J. and Naruse, K. (2019) 'AMQP Communication Interface on RT Middleware for highly-reliable IoR System Construction', The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec) 2019(0), 2A1-M09.
- (15) Yoshino, D., Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Nakamura, K., Ogawa, J. and Anma, K. (2018) 'Provision of Remote Management Infrastructure for RT Systems using Mosquitto MQTT Message Broker', The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec) 2018(0), 2A1-G08.
- (16) Daishi Yoshino : Paho MQTT Communication Modules for OpenRTM-aist Python, Github, URL: https://github.com/dyubicuoa/OpenRTM_aist_paho_mqtt_interface (Last Access, 2021.02.09)
- (17) IEEE Standard Ontologies for Robotics and Automation, IEEE Std 1872-2015, pp. 1-60, 2015.

4.3. 3D Share!

—自律ロボットを用いた 3D 計測とクラウドによる地図配布システム—

矢口 勇一 山田 竜平 丹内 智博
 鈴木 教文 渡部 有隆 成瀬継太郎

概要：本研究の最終目的は、屋内・屋外に対して、自律的に動作するロボットを用いて指定の領域をすべて 3D 計測し、その測定情報を他のロボットの測位のための地図として利用するシステムを構築することである。LIDAR による計測とステレオカメラによる計測を同時に行い、クラウド上で Robot Data Repository を用いて結合し、他のロボットのセンサーに応じて作成したエゴ地図を配布することで、異種・異なるセンサーを搭載したロボットの制御管理基盤の作成を目指す。2020 年度まで、基礎的な研究と、一連の動作の統合まで終了した。

1. はじめに

移動ロボットには外界を観測するセンサーが通常搭載されているが、それが単眼のカメラであったり、複数によるステレオ計測を行ったり、または LiDAR などによる距離計測を行うなどの違いが存在する。それらが観測から環境情報(マップ)を得て、そのマップ上のどこに自己が位置しているのかを計量する技術を Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) と呼ぶ。基本的に、単一の環境内で一機だけのロボットが動作する場合は、ロボット内のデータストアにマップが配されていれば良いが、単一の環境内に複数台のロボットが存在する場合は、その環境を表す同一のマップ上に各機体位置が共有され、お互いの位置関係を把握するか、直接的に相手を自分のマップ中で観測し、相手位置を把握するかのどちらかの手法を取らなければ、衝突回避や共同作業などを行うことができない。

Fig. 1 は、災害対応ロボットや、現地に新しく来たロボットたちが、どのように動作を獲得するかについて記している。ロボットはシナリオやタスクを定義されて動作を生成するが、動作を生成するにはマップが必要であり、マップがあって初めて動作を生成し、上位系の制御による事前の衝突回避や、自己のもつセンサーによって衝突回避を行う等の行動をもって、タスクを全うすることができる。つまり、環境の観測を行い、マップを得、それを共有することはロボットの社会実装で一番重要な項目であると考えられる。

そのため、本稿では、ロボットデータリポジトリを用いたロボットのマップの共有のためのスキームと、各個別のマップを共有するための統合手法について研究した成果を述べる。

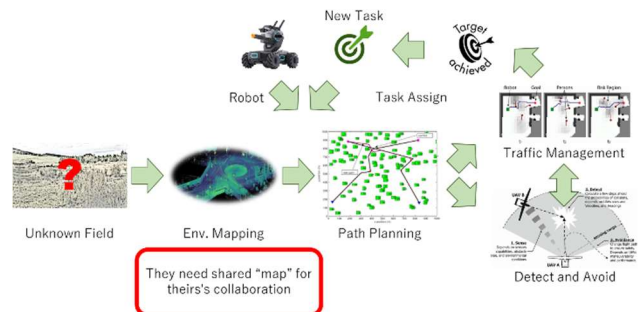


Fig. 1. Multi-Rover Scenario

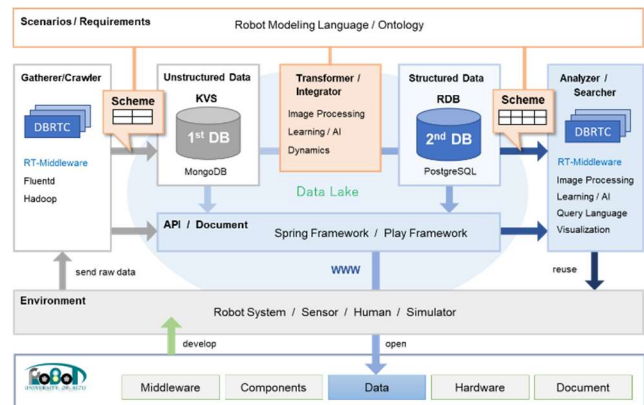


Fig. 2. Multi-stage DB Illustration

2. 3D Share! のためのデータスキームと管理

本稿では、3D Share! と呼ぶシステムを提案している。このシステムでは、データ取得及び管理のスキームにロボットデータリポジトリ[1]を用いることを検討している。ロボットデータリポジトリの仕組みは、Fig. 2 にある通り、各データオブジェクト間の操作を機能オブジェクトとして定義し、データオブジェクトと機能オブジェクトを挟みながら数珠繋ぎにすることで、スキーマ変更後のデータを残しつつ、デ

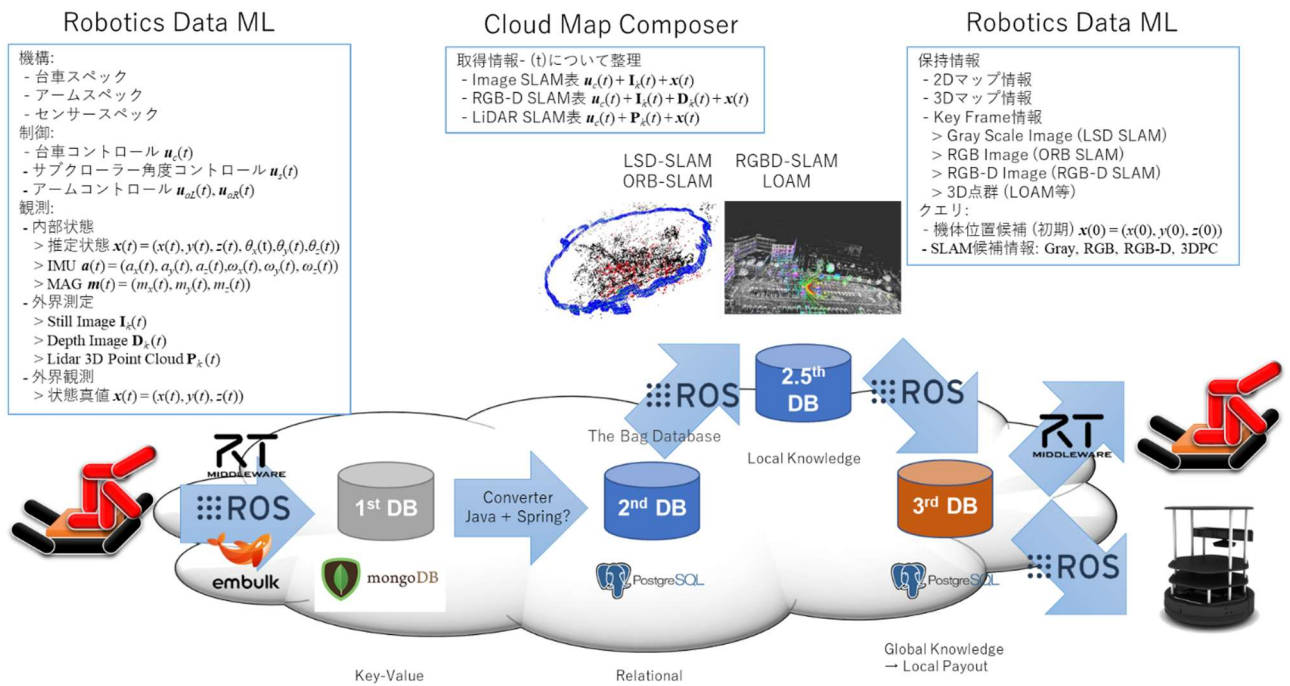


Fig. 3. Original Design of Sharing Map

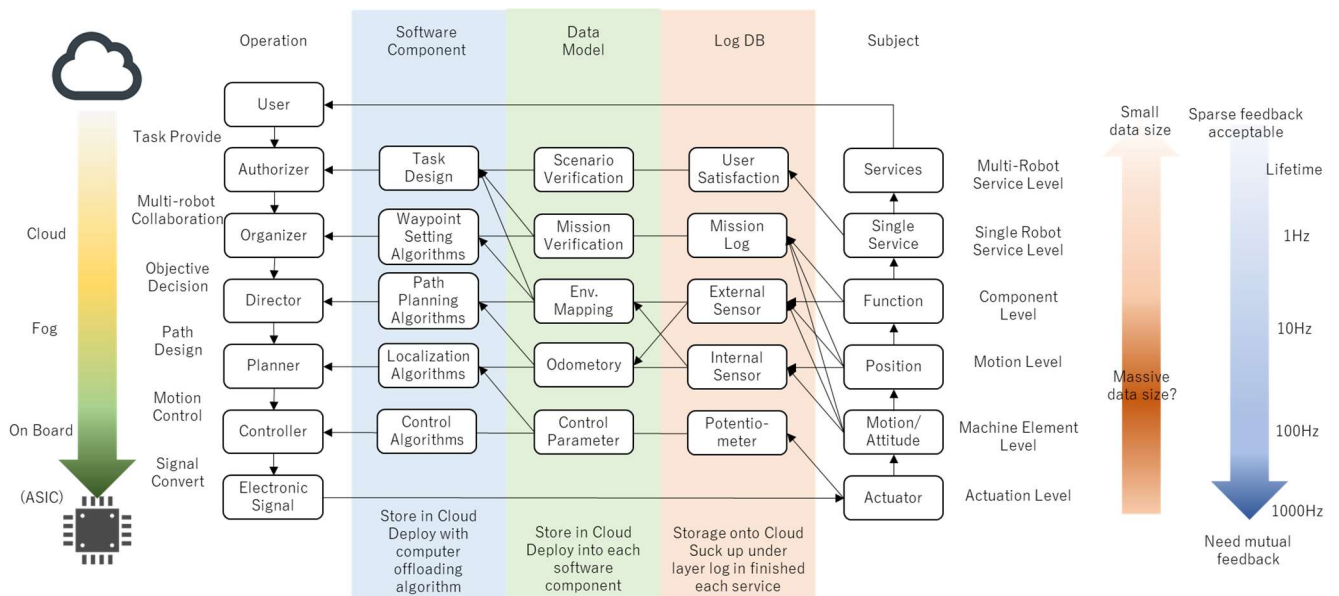


Fig. 4. Temporally asynchronous data stream from each robots

データベースのトランザクション管理を行うことで、目的のデータを取得することができる仕組みである。これらの仕組みを利用して、ロボットが取得したデータを1次DBとして収集し、複数台利用して取得されたデータを時系列性や位置関係によって2次DBとして整理し、それをを用いてソシオ地図と呼ばれる統合マップと、エゴ地図と呼ばれる各センサー固有の情報のみで与えられるマップを生成していく。また、ソシオ地図とエゴ地図の間での対応関係を別のデータベースとして保持することで、異種複数のセンサーを統合したマップを作成することができ、ロボット上位系の動作管理はソシオ地図を用い、ロボットの自己位置推定のための情報は、搭載しているセンサーに沿ったエゴ地図を配することで

可能と考えている。(Fig. 3.)

この時、Fig. 4.のように、ロボットの中にあるセンサー類も、上位系の収集スキームも、扱う周期が違うことから、実際にはこのスキームは完全にリアルタイム性を持たせることは少々難しい。しかし、事前に構築されたマップが存在すれば、指令と共にエゴ地図を配送することで、ロボット内部では100Hz~1000Hzの粒度でのセンシングによる自己位置推定が可能となり、同時に、得られた自己位置を1~10Hz程度のクラウドやサーバーと共有することにより、上位系から十分に精度の高いプランニングや衝突回避を行うことができると考えている。

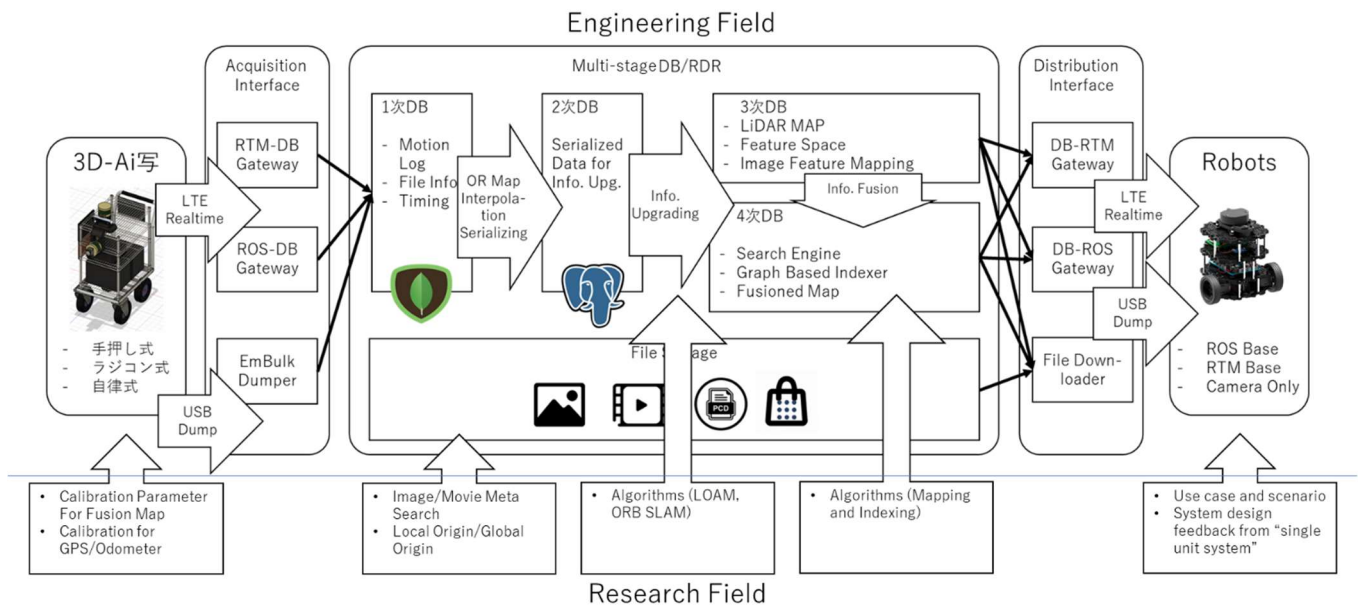


Fig.5. Entire system design

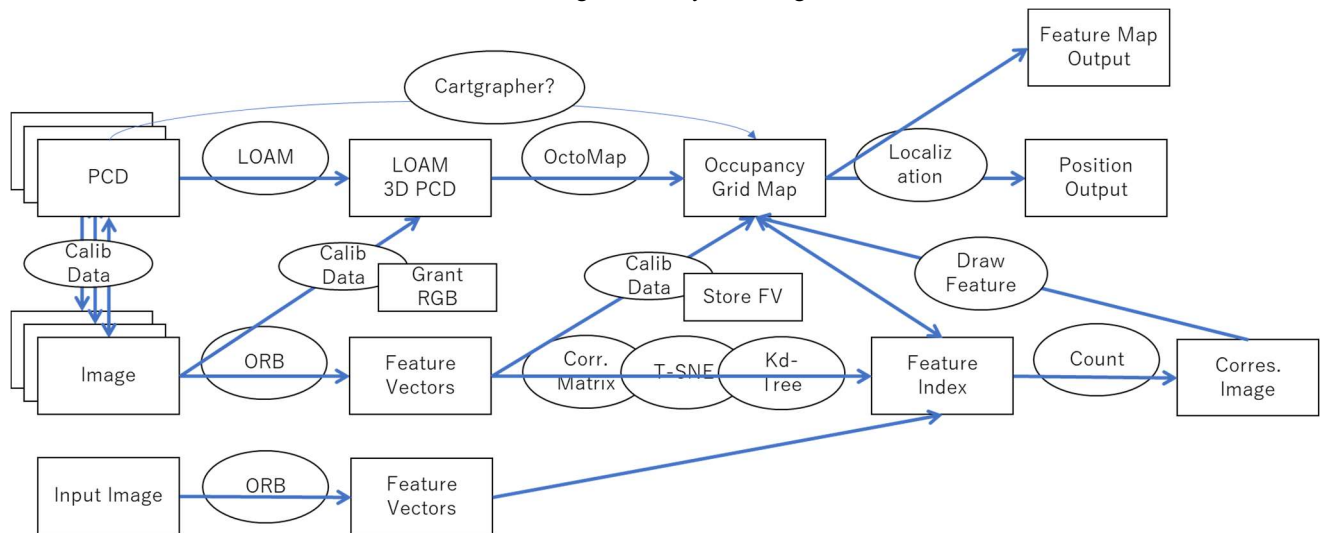


Fig.6. Fusion design between 3D point cloud and 2D complex feature points

3. 3D Share! のためのデータ取得

3D Share! のデータ取得のために、現在は手押し式の 3D-AI 写システムと、遠隔自動操縦を目指す 3D-AI 写システムを構築している (Fig. 5.)。このシステム上には ZED ステレオカメラと 360 度カメラ (Codac PIXPRO)、Velodyne VLP-16 LiDAR PUCK 2 基を搭載している。ZED ステレオカメラは正面方向のカメラとして、ステレオ視も用いられるようにし、360 度カメラは頂点方向を進行方向にして、前方半球を全てカバーできるようにしている。また、VLP-16 は水平方向と横輪切り方向 (前面側アタッチ) に着けて、左右に十字に交差するように設定している。また、遠隔自律運転可能な型の方は、Pixhawk2 を用いて ROS ベースでのコントロールを行うことができるように構成され、その中に IMU と GPS を含むことができることから、IMU がサポートされる LIDAR-SLAM 等を実装することが可能となっている。

これらのものを用いて取得されたデータを、ROS ベースの SLAM アルゴリズムを用いてマップを形成する。その部分については、ロボットデータリポジトリの内部での記述となる。

4. 取得データの統合手法

取得されたデータを相互に校正し統合する部分は、本研究の中でも重要なパートとなる。特に、同種のデータでも設置の違うもの (LiDAR-LiDAR 間) や、異種間データ (単眼/ステレオカメラ - LiDAR 間、魚眼カメラ - LiDAR 間) 間の校正 [2-3] を行い、その校正を行った変換行列を 3D-AI 写機体の仕様パラメータとして保持する必要がある。例として、単眼カメラによる SLAM を行う ORB-SLAM で用いられる特徴量 ORB [4] と LiDAR の点群の統合手法について記す。

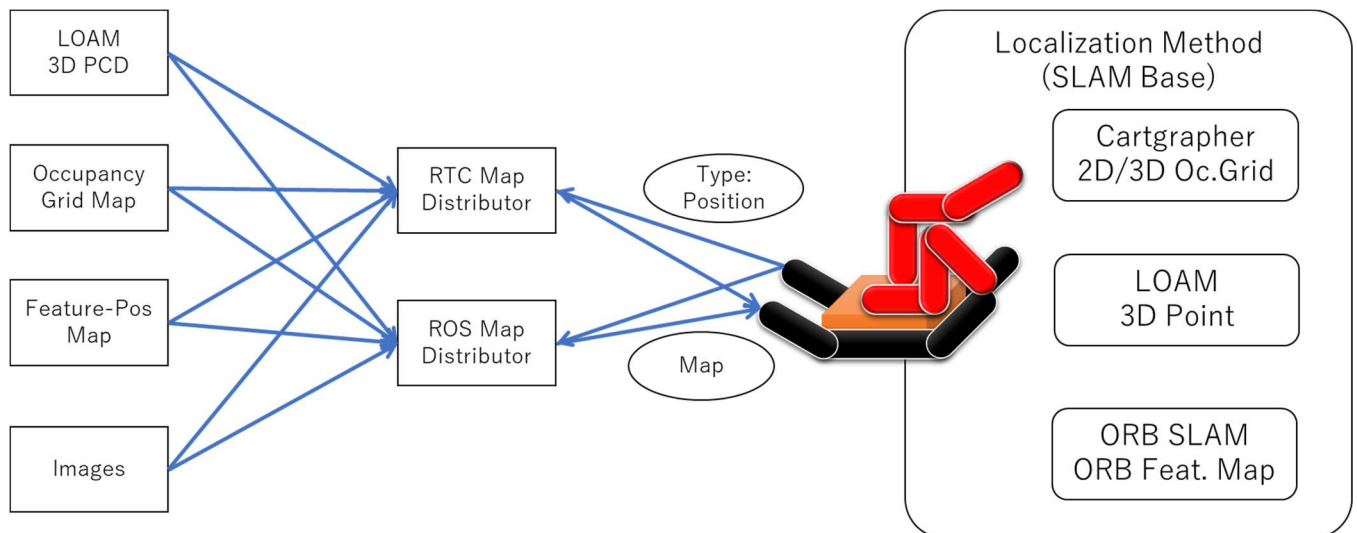


Fig. 7. Distribution map design to the other robots

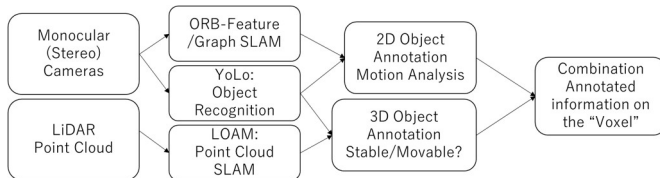


Fig.8. Annotated SLAM Image: merge feature information on 3D space with voxel-based expression

Fig. 6は、3D LiDAR 点群と 2D Image 点群から取得されたデータをいかに統合するかの図である。3D 点群は各々 LOAM 等のアルゴリズムで統合可能であるが、同時に、占有格子図を用いてそれらの点がどの 3D 格子 (Voxel) に含まれているかを表現できる。一方で、LiDAR の点群と画像のピクセルの間で校正されたパラメータを用いて、ORB 点群も 3D 中の光線として表現される。この光線のうち、LiDAR を用いた Voxel に含まれる点群と光線が交わる点が、ORB の 1 点が含まれるだろう Voxel として指定できる。また、ORB の特徴点をバグ化して保持しておくことで、それが Index となり、他の画像から得られた ORB 特徴量と比較して類似する特徴量を抽出、その特徴が含まれている Voxel から再投影誤差を求め、自己位置推定を行うことができると考えている。また、画像中に物体認識後のアノテーション情報を含めることで、指定された領域の Voxel が同時にアノテーション可能となるため、このスキームを Annotation SLAM と呼んで研究を進めている (Fig.7)。

5. 取得後データの分配について

Fig. 8は、マップ作成後のロボットへのデータ配分の手法についての概略図を記している。LiDAR や ORB 特徴量などによる 3D 化された点群位置 DB から、当該の機体に対してマッチする情報をいくつかの方法で送付し、またその間でのやり取りの定義を行うことで、確実に実機へと送付すること

を考えている。特に、我々のプロジェクトでは OpenRTM-aist を中心に用いていたが、ROS 等で構成された実機のために、それらを行うことのできる口を提供し、それらに繋ぐことでデータを取得できるようにすることを考えている。また、利用するアプリケーションによって、配付されるべきマップも異なるので、そのような型等の情報も、実機側から送付されることで、対応するマップを取得できると考えられる。

6. まとめ

本稿では主に、3D Share! として構築しているロボットデータリポジトリを用いたマップ構築・配信システムの原理について紹介した。実際には、データ等の取り回しとして、一連のデータの取得及び別なロボットへの配布までを行っており、これらの実装については、山田氏の報告書を参照されたい。また、未実装である部分についても、今後研究を進めていき、実際のロボットシステムへの実装ができるよう努力していきたい。

文 献

- (1) Watanobe, Y., Yaguchi, Y., Miyaji, T., Yamada, R. and Naruse, K. "Data Acquisition Framework for Cloud Robotics," In 2019 IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), pp. 1-7, October, 2019.
- (2) Yamada, R., and Yaguchi, Y. "Evaluation of calibration methods to construct a 3-D environmental map with good color projection using both camera images and laser scanning data," Artificial Life and Robotics, 25(3), 434-439, 2020
- (3) Yamada, R., Yaguchi, Y., Yoshida, M., and Kobayashi, S. "Towards a system for analyzing accidents of unmanned aerial vehicles". Artificial Life and Robotics, 24(1), 94-99, 2019
- (4) Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In 2011 International conference on computer vision (pp. 2564-2571). Ieee.

4.4. 災害対応ロボット開発およびロボット人材育成

会津大学 中村 啓太

概要：Stage II 産学連携ロボット研究開発支援事業において、中村が担当した各ロボット競技会に向けた災害対応ロボットの開発や社会人向けロボット人材育成講習会について紹介する。また、これらの経験を通じて、様々な展開を行っており、その展開事例についても同様に紹介する。

1. はじめに

この節では、Stage II で、中村が担当した内容について述べる。中村は、この三年間で災害対応ロボット開発、ロボット人材育成に取り組んできた。株式会社アイザックと行った災害対応ロボット開発、およびその展開事例を2章で報告し、株式会社FSKと行ったロボット人材育成、およびその展開事例を3章で報告する。最後に今後の展望を述べて、本節をまとめる。

2. 災害対応ロボット開発

〈2・1〉WRS2018 災害対応標準性能評価チャレンジに向けた開発

Stage I 産学連携ロボット研究開発支援事業において、株式会社アイザックが開発した小型災害対応ロボット E2 Spider(1)を対象にソフトウェアによる遠隔操作支援の改良を行った。2017年では、Kinova社のJacoアーム(2)(3)を2本搭載することで、障害物の把持動作を可能にしていた。

WRS2018 インフラ・災害対応カテゴリー災害対応標準性能評価チャレンジ(4)に、E2 Spiderで挑戦するにあたって、ソフトウェア開発を行った。まず初めに、E2 SpiderのクローラやJacoアームの状態を可視化するために、ロボットシミュレータChoreonoid(5)との連携を行った。これにより遠隔操作初心者でも容易に2つのアームを動かすことができた(6)。また、Choreonoidを使用することで、遠隔操作体験により、遠隔操作画面を事前に把握できるため、どのように操作をするべきかなどの対策を組むことができる。次に、遠隔操作において空間を把握するために複数のカメラが必要になるが、メディア転送で使用されているNDIライブラリ(7)を利用して、遅延が少ない状態で映像群を取得できるようにした。また、カメラが取得した画像にQRコードが含まれていると認識している場合は、そのQRコードの読み取り結果を表示するようにした。さらに、Jacoアームの指の箇所シリコンゲルグリップをかぶせることで、把持力を向上させ、バルブ開閉作業を容易にした(8)。

2018年度のE2 Spiderの遠隔操作システムを図1に示す。さらに、WRS2018挑戦に向けて、構築したシステム起動をスクリプト化することで、各ノートパソコンでスクリプトを1回実行するだけで、3分で遠隔操作ができる状態にした。

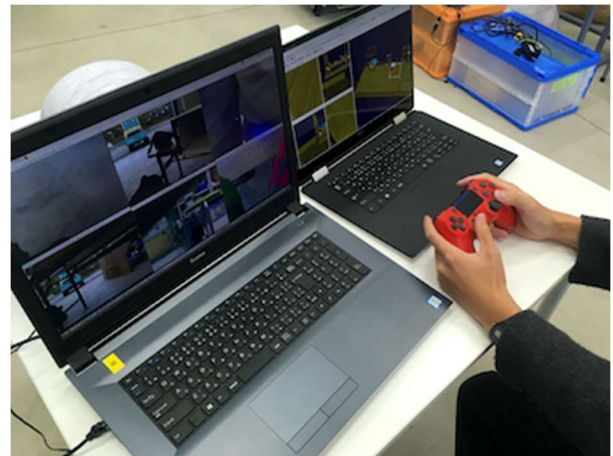


図1. Overview of E2 Spider system for WRS2018

また、スクリプトが終了すると自動的に起動前の状態に戻るため、トラブルが発生してもオペレータのみで短時間に復旧することが可能となった。これにより、WRS2018本番では、19参加チーム中13位で予選敗退とはなかったが、予選での全8回の競技挑戦でトラブルなく動作することを確認できた。

〈2・2〉ロボカップ ジャパンオープン JapanOpen2019 長岡 レスキュー実機リーグに向けた開発

WRS2018での災害対応ロボット開発は、ハードウェアの整備に時間がかかり、ソフトウェア開発に時間を割くことができなかったため、ロボカップ ジャパンオープン JapanOpen2019 長岡 レスキュー実機リーグ(9)に挑戦するにあたって、開発したソフトウェア群の洗練を行った(10)。まず初めに、2018年に実装した映像群取得に対して、自由に映像選択して表示することができるスイッチの実装を行った。これにより、カメラ台数が増えたとしても、限られた通信帯域で無駄に帯域を消費せずに遠隔操作を行えるようになった。そして、複数のQRコードを認識した場合には、各QRコードの値をそれぞれ表示するように改良を行った(図2)。そして、Readiness Testとよばれる基本システム検査ができるように、双方向音声通信機能、動体検知機能、CO₂濃度表示機能、熱カメラ表示機能、Hazmatタグ認識機能を実装した。さらに、レスキュー実機リーグ決勝進出を目標として、EXP(Exploration)種目の1つである



図 2. Implementation for multiple QR codes reading

Large Area Inspection 競技で得点する戦略を取った。大会直前に、この競技が実施されることが発表されたため、既存のハードウェアで、ロボットが静止している状態を前提として、位置と色がわかる RGB-D カメラと腕の位置から、QR コードの位置を計算し、画像を合成することで QR コード情報付き三次元地図を生成するソフトウェアを開発した。レスキュー実機リーグ当日の競技変更により、Large Area Inspection 競技の対象が壁面ではなく、Culvert 状になり、開発した三次元地図生成をコースに適用できなかったが、地図生成をせずに、読み取った QR コードを画面に出力し、ファイルにも書き込むように変更することで、Large Area Inspection 競技で得点を得ることができ、12 参加チーム中 4 位の予選結果となり、目標である決勝に進出することができた。

しかしながら、E2 Spider は、MAN(Maneuvering)種目、MOB(Mobility)種目のような不整地走破性を評価する種目では、得点することができないため、不整地走破をしながらタスクを実施することを目的とした決勝では得点することができなかった。この結果を踏まえて、ソフトウェア開発だけではなく、ハードウェアの改良も必要であると感じた。

〈2・3〉WRS2020 災害対応標準性能評価チャレンジに向けた開発

WRS2020 インフラ・災害対応カテゴリ災害対応標準性能評価チャレンジ(11)での全競技で得点できるように、アイザック社が新開発した Giraffe をベースとした Spider2020 を対象にハードウェアの改良を行った。ロボット前後のバランスを取るために、Kinova 社の Jaco アームを 1 本だけ搭載することにした (図 3)。さらに、ロボット左右それぞれに 360 度カメラを搭載することで、サブクローラ周辺の状況がオペレータによりわかるようにした (図 4)。ここまでの開発成果を YouTube(12)で公開している。また、DNN(Deep Neural Network)を用いたアナログメータの自動読み取り方法を開発した(13) (図 5)。さらに現在、ソフトウェア開発として、「RGB-D カメラがついたロボットアームを移動させることで、物体認識、姿勢推定をする方法、および対象物の向きに応じて、物体を自動的に把持する方法の開発」

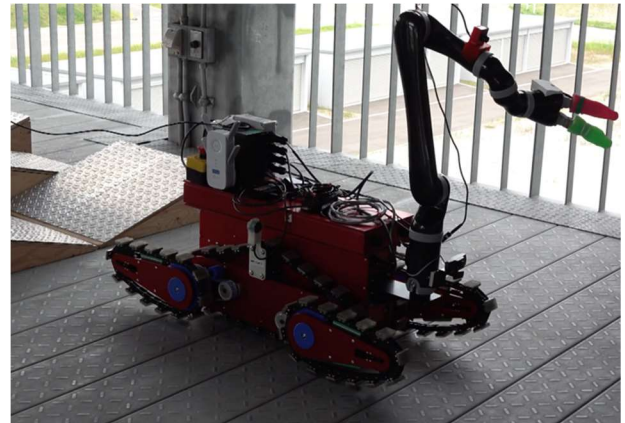


図 3. Spider2020 for WRS2020

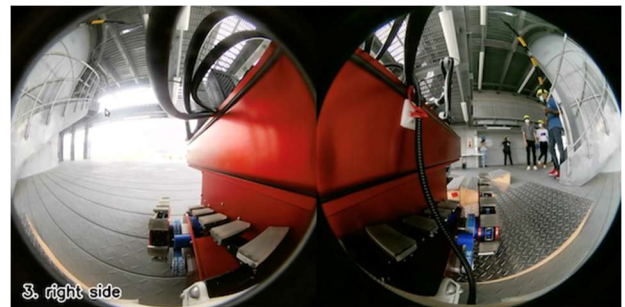


図 4. Acquisition of subcrawler status by 360-degree camera



図 5. Automatic analog meter reading

「RGB-D カメラによる遠距離撮影した画像群と近距離撮影した画像群から含まれる QR コードの位置特定を行い、その位置情報に基づいて、画像のマッチングを行うことで、3 次元地図を生成する手法の開発」、「目盛間隔が線形関係であることを利用した最大値が異なるアナログメータ自動読み取り方法の開発」を行っている。これらの WRS2020 に向けた開発の詳細説明を YouTube(14)で公開している。



図 6. Performance evaluation procedure of unmanned aerial vehicle for bridge inspection

(2・4) ロボットの性能評価試験を経験して

WRS 災害対応標準性能評価チャレンジやロボカップレスキュー実機リーグへ挑戦することで、ロボットの性能評価試験に関して興味を持つようになり、災害対応ロボットの開発に関わりながら、2018年度から2020年度、『NEDOプロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開／ロボット性能評価手法に係る特別講座』の1つである「無人航空機を活用した橋梁点検分野に関する性能評価講座」の主任講師としての活動を行っている(15)。この活動では、インフラ点検や災害対応に活用されるロボットの性能を評価するための「性能評価手順書」(16)の普及、および福島ロボットテストフィールドの利用促進を目的としており、福島ロボットテストフィールド試験用橋梁で無人航空機による橋梁点検試験も行い(図6)、現在、橋梁点検のための無人航空機に関する性能評価手順書の改訂に向けて活動を行っている。

3. ロボット人材育成

(3・1) デュアルウェア講習会

Stage Iでは、会津大学の強みであるICT(Information and Communication Technology)を活用したロボット開発の技術支援、および福島・国際研究産業都市(イノベーション・コースト)構想実現への貢献を目的としていた。その取り組みの一環として、RTミドルウェアの1つである

OpenRTM-aist(17)の技術取得を目的とした『RTミドルウェア講習会』をこれまで8回開催した(18)。これまでの取り組みでは、主にミドルウェアを導入したロボット制御プログラムを作成できるような講習会などを立案・実施してきた。しかしながら、センサやアクチュエータのRTコンポーネント化は、機械・電子・情報などの専門分野の知識が必要であるため、これらの分野を学べるようなロボット技術者育成ができるような講習会を企画する必要がある。

一方で、現在流行しているシングルボードコンピュータRaspberryPiを利用したIoT(Internet of Things)入門では、GPIO(General-Purpose Input/Output)、I2C(Inter-Integrated Circuit)、SPI(Serial Peripheral Interface)、UART(Universal

Asynchronous Receiver/Transmitter)、PWM(Pulse Width Modulation)などを一通り扱う。しかしながら、電流をトリガーとした実用システムを構築することを考えた場合、ソフトウェアによる制御だけではなく、ハードウェア側でチャタリング防止機構がないと、システムが安定しない。つまり、より高度な電気・電子回路の知識が必要となる。ゆえに、ロボット機構(機械)、ロボット回路(電気・電子)について理解していないと、プログラムを利用した効率的な制御ができない。

そこで、ロボットハードウェアとロボットソフトウェアを理解したロボットシステムインテグレータ(デュアルウェア技術者)が必要と考え、『デュアルウェア講習会』を2019年2月21-22日に開催した(18)。この講習会では、回路の組み立て方、データシートの読み方を勉強し、ハードウェアの仕様をソフトウェアに反映させる方法を学び、温度センサの値をGmail APIと連携させたIoTシステムを構築する方法を実践形式で行う。また、デュアルウェア講習会の発展内容として、『デュアルウェア講習会II』を2020年3月3日に開催した。この講習会では、センサ情報をDBに格納し、DBに格納されたデータをリアルタイムに可視化することを実践形式で行う。この講習会で得られた知識を使うことで、センサやアクチュエータのRTコンポーネント化だけでなく、一般的なレガシーシステムのIoT化の応用が可能となる。詳しい講習会の様子をYouTube(19)で公開している。

(3・2) ロボットシミュレータ Choreonoid 講習会

近年、ロボットシミュレータが高機能化、および高精度化になり、ロボットの事前動作確認や遠隔操作練習などによる開発作業の効率化や、ロボットオペレータの育成を行うことができ、様々な分野に活用することが可能になった。また、WRSインフラ・災害対応カテゴリートンネル事故災害対応・復旧チャレンジでは、ロボットシミュレータChoreonoidを用いたシミュレーション競技として採用されるなど、ロボットシミュレータの活躍の場が広まり、ますます需要が高まっている。そこで、ロボットシミュレータChoreonoidの使い方を学べる講習会が必要と考え、講習会を立案し、2020年3月9日に開催した。

この講習会では、ロボットシミュレータChoreonoid上でのロボットモデル操作方法を身につけることを目的としており、最初に、Choreonoidでのロボットシミュレーションの方法を学ぶ。そして、プログラミングによる制御コントローラ的设计方法を身につけるために、『①Dualshock4のスティックによる制御』、『②センサ値による前進・旋回・停止動作制御』、『③色認識によるラインレース制御』を行うコントローラ的设计を行う。詳しい講習会の様子を、YouTube(20)で公開している。この講習会で身につけた知識を使うことで、Choreonoidで読み込むことができるロボットモデルの操作が可能となる。2020年度は、withコロナ/afterコロナ

み、競技形式で技術を競い合う内覧会を立案し、2020年11月7-8日に実施した。またこの内覧会では、YouTubeを利用したライブ配信も並行して実施した(図8,9)。

さらに、2019年度から2020年度、ICT人材育成を目的とした、原町高校の生徒、相馬農業高校の生徒、小高産業技術高校の生徒を対象にしたプログラミング教育を行うための資料作成をし、講習会を行った。2019年度では、プログラム入門としてPythonを学ぶ講習会を行った。この資料は、2018年度の浜通りロボット人材育成事業の際に作成した資料を改良することで資料を作成している。また、PepperをPythonで制御する講習会の立案および資料の作成を行い、Choregrapheとよばれるアプリケーションにある仮想Pepperや実機のPepperに体する発声制御、関節制御、移動制御を学べる講習会を実施した。2020年度では、2019年度の内容に加えてProcessing-Pythonを使用した可視化プログラムの基礎を学び、アニメーションや簡易なゲームを可能にするプログラムを学べる講習会の立案、および資料の作成を行い、講習会を実施した。

4. おわりに

本節では、Stage IIで中村が担当した内容について紹介をした。災害対応ロボットの開発をしながら、ロボットの性能評価試験に関する知識を身につけることができ、様々な分野に応用をすることができた。一方で、社会人向けロボット人材育成では、様々な資料を作成し、講習会を実施してきた。こちらの方も、資料を高校生・大学生向けに展開することで、ロボット人材だけではなく、ICT人材育成にも応用することができた。

今後の展望として、各ロボット競技会に向けた災害対応ロボットの開発をするのではなく、災害対応ロボットに関する研究開発成果を平時利用することや、これまで作成したロボット・ICT人材育成資料をRTC-Library-FUKUSHIMAに体系的に公開することで、誰でも自由にロボット、およびICT技術を学べるような環境を構築したいと考えている。

謝辞

Stage Iから引き続き、株式会社アイザック様、株式会社FSK様には大変お世話になりました。また、災害対応ロボット開発および人材育成講習会に関わったすべての皆様から心からお礼申し上げます。

文 献

- (1) E2 Spider, <http://www.aizuk.jp/spider.php>, アクセス日: 2021/02/15
- (2) KINOVA Gen2 Ultra lightweight robot, <https://www.kinovarobotics.com/en/products/gen2-robot>, アクセス日: 2021/02/15

- (3) Kinova Grippers, <https://www.kinovarobotics.com/en/products/accessories/grippers>, アクセス日: 2021/02/15
- (4) WRS2018: 災害対応標準性能評価チャレンジ, <https://worldrobotsummit.org/wrc2018/disaster/standard.html>, アクセス日: 2021/02/15
- (5) Choreonoid ホームページ, <https://choreonoid.org/ja/>, アクセス日: 2021/02/15
- (6) Keita Nakamura, Kenta Tohashi, Yuki Funayama, Hikaru Harasawa and Jun Ogawa, Dual-arm robot teleoperation support with the virtual world, *Artificial Life and Robotics*, volume 25, pp.286--293, 2020.
- (7) NewTek NDI SDK, <https://ndi.tv/sdk/>, アクセス日: 2021/02/15
- (8) Jun Ogawa, Syota Seki, Ryuya Ninomiya, Yuki Funayama and Keita Nakamura, Soft Material Gripper for Extending Robotic Hand Embodiment, *Proceedings of the 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 24th'19)*, GS22-1, 2019.
- (9) ロボカップ ジャパンオープン JapanOpen2019 長岡 レスキュー実機リーグ, <https://sites.google.com/site/robocupjorescuerobotleague/japanopen2019-nagaoka>, アクセス日: 2021/02/15
- (10) 遠橋健太, 若園拓也, 蓮實雄大, 中村啓太, 矢口勇一, 成瀬継太郎, RT ミドルウェアによる双腕レスキューロボットシステム開発, 20 回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, 1D1-08, 2019.
- (11) WRS2020: 災害対応標準性能評価チャレンジ, <https://worldrobotsummit.org/wrs2020/challenge/disaster/standard.html>, アクセス日: 2021/02/15
- (12) 最先端クローラロボット(Spider2020), <https://www.youtube.com/watch?v=vYr9RpxOrac>, アクセス日: 2021/02/15
- (13) Yuki Funayama, Keita Nakamura, Kenta Tohashi, Taku Matsumoto, Akira Sato, Shigeki Kobayashi and Yutaka Watanobe, Automatic analog meter reading for plant inspection using a deep neural network, *Artificial Life and Robotics*, <https://doi.org/10.1007/s10015-020-00662-y>, 2020.
- (14) WRS2020 取り組み紹介, <https://www.youtube.com/watch?v=oN-p8mSIM3Q>, アクセス日: 2021/02/15
- (15) 中村啓太, 蓮實雄大, 福島ロボットテストフィールド試験用橋梁を使用した橋梁点検のための無人航空機に関する性能評価試験実施報告, 第21回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, 1A1-03, 2020.
- (16) インフラ点検や災害対応に活用されるロボットの性能を評価するための「性能評価手順書」, <https://www.meti.go.jp/press/2018/05/20180530001/20180530001.html>, アクセス日: 2021/02/15
- (17) OpenRTM-aist, <https://www.openrtm.org/openrtm/>, アクセス日: 2021/02/15
- (18) 中村啓太, 馬上雄, 荒川弘栄, 長谷川大樹, 会津大学でのロボット技術者育成講習会, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2P2-N09, 2019.
- (19) デュアルウェア講習会, <https://www.youtube.com/watch?v=iXbWn-TIR4U>, アクセス日: 2021/02/15
- (20) コレオノイド講習会, <https://www.youtube.com/watch?v=CuCbucw3MaA>, アクセス日: 2021/02/15
- (21) RTC-Library-FUKUSHIMA, <https://rtc-fukushima.jp>, アクセス日: 2021/02/15
- (22) The 1st International Joint Symposium on Practical IoT and Robotics Education, <https://sites.google.com/view/inspire2019aizu>, アクセス日: 2021/02/15
- (23) 中村啓太, 馬上雄, 荒川弘栄, 佐々木陽, 渡部有隆, 屋代眞, ロボット人材育成を目的とした実践的ロボットプログラミング教材の開発, 第20回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, 1F4-02, 2019.
- (24) Training4RobotEngineers, <https://github.com/RTC-Library-FUKUSHIMA/Education/tree/master/Training4RobotEngineers>, アクセス日: 2021/02/15
- (25) 具体的取組「教育・人材育成」 | 福島イノベーション・コースト構想, <https://www.fipo.or.jp/activities-education>, アクセス日: 2021/02/15

4.5. 災害地域への適用を目指した3次元地図生成と地図利用のためのロボットクラウドの開発

会津大学 復興支援センター 山田 竜平

概要:本研究では災害地域などでロボットが自律的に移動・作業を行うために有用となる3次元地図生成手法の構築と、その地図を遠隔地からも利用できるロボットクラウドの開発を実施した。特に3次元地図については、LIDAR点群+カメラ画像を合成した広域な色付き3次元点群地図を生成する手法を確立し、その合成のために必要なパラメータを導出する最適なキャリブレーション手法についても研究を行った。また、実際にロボットクラウドに格納した地図データを用いたロボットの自律移動も実施できた。

1. 緒言

地震や洪水等による土砂崩れや、道路の陥没が生じているエリア、火山の噴火地域等において、一般に人間が即座の調査活動や救助活動を行うのは危険を伴うので、ロボットを活用する事が期待されている。その際、ロボットの遠隔操作が必要となる一方、被災地等では通信状況が不安定な場合も想定され、ロボット自身が自律的に移動・活動することも望まれる。

ロボットの自律移動に際して、ロボット自身が今どこにいるか把握したり(自己位置推定)、障害物を認識して移動経路を策定したりするために、ロボット自身が調査エリアの地図情報を有する必要がある。この地図データは、近年発達しているSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)アルゴリズムを使用して生成可能である。SLAMによる地図生成は一般にカメラ画像やレーザセンサー(LIDAR)の測距点群データを用いて行われ、センサーを搭載したロボットの移動経路に沿った2-3次元の地図と、自己位置推定によるロボット経路を得ることができる。この際、カメラ画像によって作られた地図[e.g., [1]]は、色情報と高い解像度をもつが、距離が不正確であり、地図生成範囲もカメラ視野内に限られる。一方、LIDARの点群データからは、正確な距離と測距範囲に応じた広域の地図を作成可能であるが[e.g., [2]]、色情報をもたず、特に遠方での解像度が低い。災害地域では、土砂崩落や陥没などの不整地環境が予測されるので、なるべく正確なスケールで、かつ高い分解能と環境認識のための色情報をもった3次元地図を生成し、利用する事が望まれる。

そこで、本研究では、両センサーの利点を活用するため、LIDARの点群データとカメラ画像両方を利用した3次元データフュージョン地図を生成する手法について研究を行った。また、LIDARの点群とカメラ画像を合わせるためには、ロボットに搭載したLIDARとカメラセンサーの相対位置を表すパラメータを決定する必要がある。本研究では、そのパラメータを決定するための最適なキャリブレーション手法

についても調査を行った。

一方、災害地域では一台のロボットのみでなく、UGVやUAV等の複数のロボットが連携して、効率的に探索や作業を行う事も重要となる。その際、各ロボットが各々に地図を作成し、別個に自律移動を行えば、通信や移動の面でコストが非常に大きくなる事が懸念される。そこで、本研究では、将来的に複数台のロボットが1つの地図を共用し、連携した自律移動・作業を可能とすることを目指して、オンライン上で地図生成と地図利用を可能とするロボットクラウドシステムの開発も実施した。

本報告書では、これら2018-2020年度に実施した

- LIDAR+カメラキャリブレーション
- 3次元広域データフュージョン地図の生成
- 地図利用のためのロボットクラウドシステムの研究・開発成果について述べる。

2. LIDAR+カメラキャリブレーション

LIDAR点群とカメラ画像のデータフュージョンには、合成に必要なパラメータをキャリブレーションから決定する必要がある。本テーマでは、LIDAR+カメラキャリブレーションの評価手法と最適なキャリブレーション法についての研究を実施した。

〈2.1〉理論

本研究では、LIDAR点群を同時に取得したカメラ画像に投影して、カメラ画像から各点群にRGB値を与えることで、データフュージョンを行う。この際、LIDAR点の座標値 (x, y, z) とカメラ画像のピクセル値 (u, v) は、

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

の式で関係づけられる。ここで、 K :カメラ内部パラメータ、 T :カメラ外部パラメータである。特に、

$$T = [R \quad t]$$

R :回転行列、 t :変位行列であり、LIDAR とカメラ両センサーの相対位置を表す。カメラ内部パラメータは、簡易的なチェッカーボードキャリブレーションにより決定できるので、本テーマではカメラ外部パラメータの決定に着目する。

〈2・2〉手法

カメラ外部パラメータ T は、LIDAR とカメラの両方で、同一の物体（キャリブレーション体）を測定し、点群を画像に投影して、キャリブレーション体を投影先で合わせるようにして決定できる。本研究では、LIDAR+カメラキャリブレーションと3次元地図生成のために、図1で示す台車ロボットシステムを開発した。

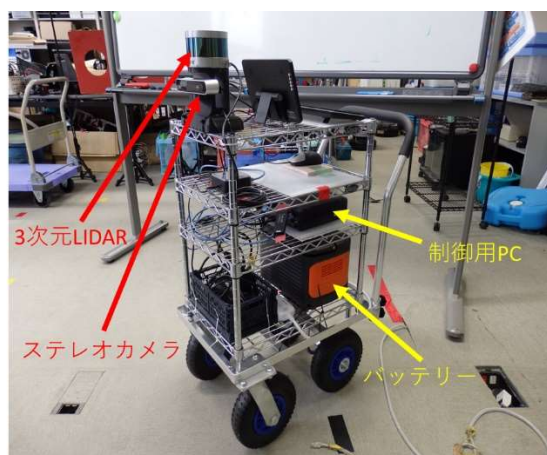


図1. 台車ロボットシステム

台車ロボットでは3次元LIDAR(Velodyne VLP-16)とZEDステレオカメラを搭載しており、制御用PCを使用して台車を移動させながら、同時にデータを取得する事が可能である。また、センサーとPCはバッテリーで駆動しており、スタンドアロンシステムとして台車を駆動できる。

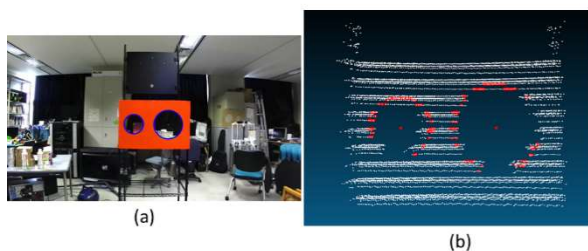


図2.キャリブレーションボード
(a)画像データ、(b)LIDAR 点群データ

これまでの T を決定するキャリブレーション研究では、チェッカーボード[3]、自然のシーン[4]、三角・四角のボード[5]等、様々なキャリブレーション体が使用されてきた。本テーマでは、図2に示すよう、Velas et al. (2014)[6]等で提案された円を切り抜いたボードをキャリブレーション体を使用する。特に赤色ボードに大円と小円の2タイプの円を切り抜くことで、円検出をより用意にし、水平方向への制約を強くしている。図2(a)に示す画像中の赤色ボードの円検出はOpenCVのHough変換により行い、(b)に示すLIDAR点群データ中の円検出にはRANSAC[7]を使用した。

〈2・3〉評価手法の設計

上述のように、様々なキャリブレーション手法が提案されている一方、どの手法が最適であるかの定量的な評価は未だ十分になされていない。そこで、本テーマでは、一般に機械学習の分野で評価に使用されるF-measureの評価法を導入し、キャリブレーションの良さを判定する手法を開発した[8]。この手法では、図3に示す白色ボードの前に3枚の赤色ボードを設置し、データフュージョンの結果で求まる色付き3次元点群の色の復元率を評価に用いる。

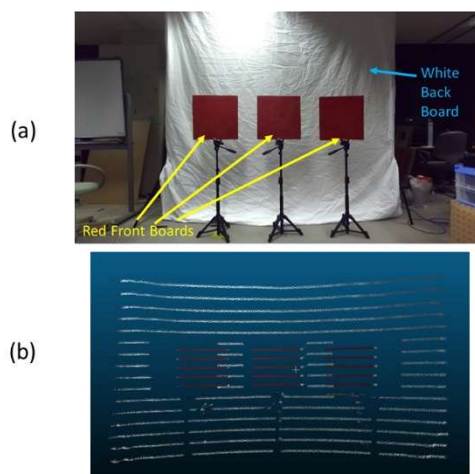


図3. キャリブレーション評価用ボード
(a) 画像データ、(b)色付き3次元点群

図3(b)がLIDAR+カメラキャリブレーションから決めたカメラ外部パラメータを使用して、LIDAR点群を画像に投影し、図3(a)の赤、白のボードを復元した色付き3次元点群を示す。この際、F-measureは

$$F - measure = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

で表され、TP(True Positive)を3枚の赤色ボード中の赤色の割合、FP(False Positive)を白色ボード中に誤投影された赤色の割合、FN(False Negative)を赤色ボード中に誤投影された白色の割合として定義する。ここで、完全な投影、データフュージョンが行えた場合、 $F\text{-measure} = 1.0$ となる。

図4では、高いF-measureと低いF-measureの投影結果を示しており、図中の水色の点が画像に投影したLIDARの点群を示す。図4からは、投影精度が高い方で、よりF-measureも高くなり、設計したF-measureの指標が有効に機能している事を示している。

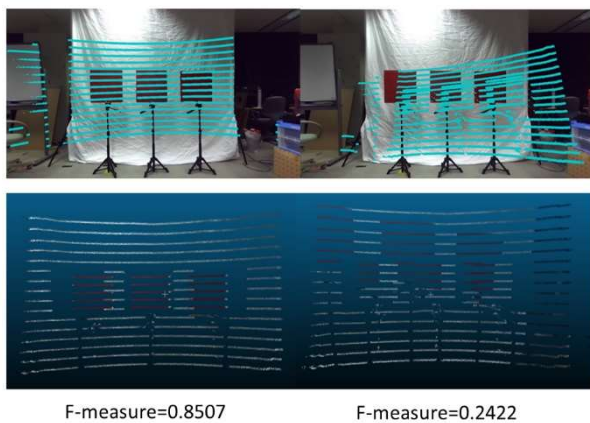


図4. F-measureの差異による投影結果とデータフュージョン結果の違い

〈2・4〉最適なキャリブレーションボードの配置

本テーマで設計したF-measureの指標を用いて、最適なキャリブレーションボードの配置についても調査した。この調査より、Yamada and Yaguchi (2020) [9]では、複数枚のボードを使用する事が良いVを得るのに有効である事を示している。また、Yamada et al. (2021) [8]では、キャリブレーション時でのセンサーからの最適なボードの距離は、データフュージョンを行う物体の位置により異なる事を示した。すなわち、近くの物体に対してはボードを近くにおいて行ったキャリブレーションが有効であり、遠くの物体に対しては遠くにおいたボードでキャリブレーションを行う事が有効である事を示唆した。

そこで、図5に示すように、3枚のキャリブレーションボードを、(Case-A)全てセンサーから3.0mの距離に設置した場合と、(Case-B)3.0, 1.5, 2.0mの異なる距離に設置した場合でF-measureがどのように異なるかについても調べた。図6に図5の配置に対するF-measureの調査結果を示す。ここで、図3に示す評価ボードはセンサーからの距離1.0-3.0mの間で0.5mずつ配置を変え、各距離に対するF-measureの値を示している。図6より、評価ボードのあらゆる距離に対して、Case-Bの方が高いF-measureが得られている。以上から、本テーマでは、複数枚のキャリブレーションボードを様々な距離に配置することが、良いカメラ外部パラメータを得るのに有効である事を定量的に示す事ができた。

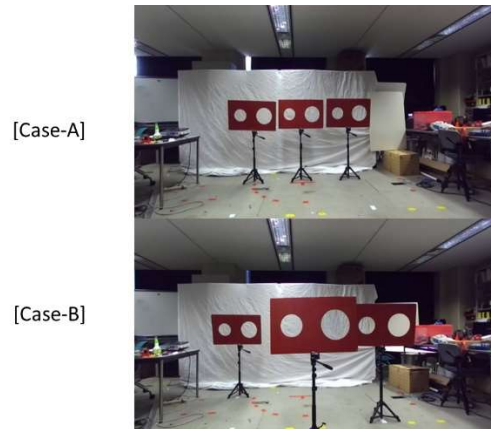


図5. 2つのケースにおけるキャリブレーションボードの配置。(Case-A)3枚のボードを3.0mの位置に配置。(Case-B)3枚のボードを3.0, 1.5, 2.0mの位置に配置。

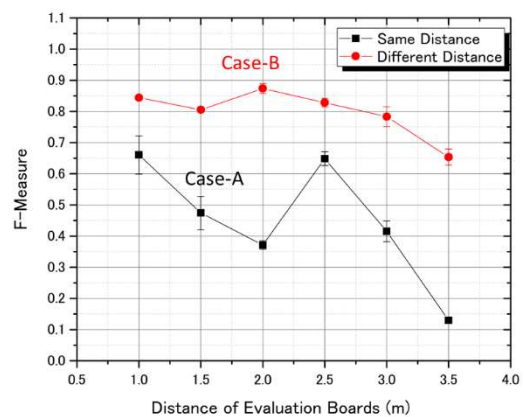


図6. 2つのケースの複数キャリブレーションボードの配置(図5)に対するF-measureの結果

3. 3次元広域データフュージョン地図の生成

本テーマでは、先に求めたカメラキャリブレーションパラメータを用いて、広域な3次元データフュージョン地図、ここでは色付き3次元点群地図を構築する手法を開発した。

〈3・1〉地図生成手順

開発した3次元広域データフュージョン地図の生成手順は以下である。

- (1) 地図生成を行う環境下でのLIDAR-3次元点群データ、カメラ画像、ロボット経路データの同時取得
- (2) 点群データ、カメラ画像、ロボット経路の時刻データを用いたデータマッチング
- (3) カメラパラメータを使用した3次元点群の画像データへの投影と色付き3次元点群データの生成
- (4) ロボット経路データを用いた色付き3次元点群データの貼り合わせと広域データフュージョン地図の構築

以下、各手順の詳細と3次元広域データフュージョン地図の構築例を示す。

〈3・2〉地図データの取得

地図データは図1で示した台車ロボットシステムを使用して地図生成する環境を回りながら取得する。Velodyne-VLP-16の3次元点群データとZEDステレオカメラの両眼画像はROS(Robot Operating System)を使用して記録し、サンプルごとにPCの記録時刻のタイムスタンプを付与する。点群データは各ロボット位置で360degスキャンしたデータが一つのPCDファイルに記録される。また、ロボット経路はLIDAR-SLAM手法の一つであるLOAM[2]を使用して推定した値を用い、同様にタイムスタンプを付与した台車の3軸の移動量とクォータニオンで表す回転量を得る。

〈3・3〉広域地図の構築

始めに、点群データ、画像データ、経路データの3種のデータのマッチングを、タイムスタンプを参照して行う。データ取得時刻は同期していないので、異種データ間のタイムスタンプの差分を取り、最も差分が小さい組み合わせでマッチングさせる。

次に、2章で述べた手法で求めたカメラ内部・外部パラメータを用いて、LIDAR点群をマッチングさせた画像に投影し、データフュージョンにより色付き3次元点群データを生成する。この色付き点群データはPCDファイルごとに得られる。

その後、生成した色付き3次元点群の各ファイルデータを貼り合わせて広域な3次元地図を構築する。ここで、各ファイルデータはデータ取得時のロボット位置を原点とした周辺のスキャン情報であるので、ロボット経路に沿った点群位置の補正を行う必要がある。その際、先にタイムスタンプでマッチングさせたロボット経路データ(変位、回転)を使用して、点群位置を補正し、貼り合わせを行う。

図7は、会津大学構内の施設であるLICTiAの1Fスペースの一部の領域のデータフュージョン前後の3次元地図の比較を示している。フュージョン前はLIDAR点群データより、LOAMを用いて構築した3次元点群地図であり、フュージョン後は本手法で構築した色付き3次元地図点群地図である。図7の結果は、データフュージョンを行うことで、例えばLIDARデータのみでは認識できない壁面の物体(ポスターや火災報知器等)を認識しやすくなっている事を示している。これは、今後、データフュージョン地図をロボットナビゲーションに利用する際、物体認識を用いたオペレーションも利用可能になる可能性も示唆している。

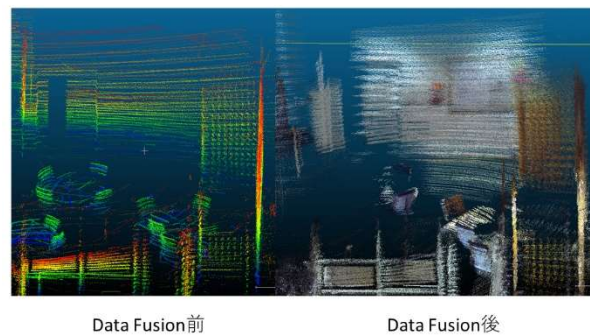


図7 会津大学LICTiA-1Fにおけるデータフュージョン前後の3次元地図

災害地域への同手法の適用を視野に置いて、福島ロボットテストフィールド(RTF)の不整地試験フィールドでも、色付き3次元地図の生成を試みた。図8は不整地フィールドの土砂倒木エリアにおける写真と色付き3次元点群地図を示している。図中の地図では色付き3次元点群と通常の点群地図とを重ねて表示している。図8の写真に示されるよう、土砂倒木エリアは土砂の積もった丘になっている一方、点群地図上では丘の部分が閉じず、地図が不十分である事が示されている。これは、LOAMアルゴリズムにループ閉じ込みの機能がついておらず、土砂のような特徴のない地形では地図が十分に閉じない事を示唆している。また、図1で示す台車では前方カメラしかなく、台車側面方向の地形の色付けが不十分であり、かつ細かい凹凸の再現が困難な事も分かった。不整地で正確なデータフュージョン地図を構築するには、ループ閉じ込み機能がついたLIDAR-SLAMアルゴリズムの使用や、台車への複数のカメラ、LIDARの組み込みが重要となる。

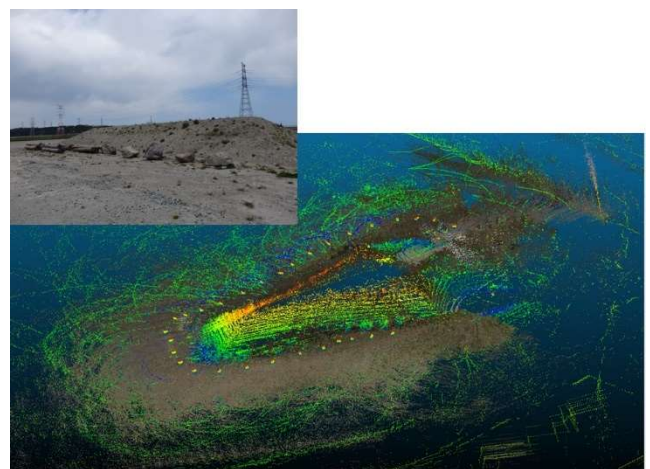


図8. 土砂倒木エリアの写真(左上)と色付き3次元点群地図

4. 地図利用のためのロボットクラウド開発

本テーマでは、遠隔の災害地にいるロボットのセンサーデータを用い、その入力データから地図を自動に生成して、任意のロボットがアクセスし、その地図を利用できるようなロボットクラウドの開発を実施した。本クラウドは(株)東日本計算センターとの共同で、ロボットデータリポジトリ(以下、RDR)の一部としての開発を行った。

〈4-1〉ロボット地図用 RDR の構造

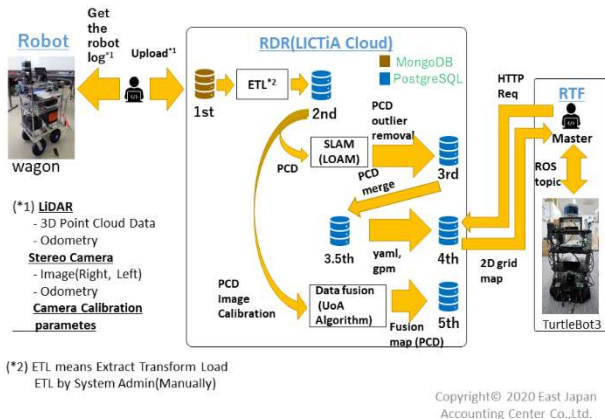


図 9. ロボット地図用 RDR の全体構造

図 9 では本テーマで開発した地図生成・利用のための RDR の全体構造を示す。RDR 内では 5 次 DB まで存在し、各 DB で処理段階の異なる地図データを格納している。RDR への入力データは、ロボットに搭載した LIDAR の点群データ、LOAM によるロボット経路データ、両眼ステレオカメラ画像、及び、キャリブレーションで決定したカメラ内部、外部パラメータである。また、各データにはサンプルごとにタイムスタンプを付与するようにしている。以下、各 DB に格納されるデータについて記載する。

- 1 次 DB
生の入力データ(LIDAR 点群、LIDAR-SLAM によるロボット経路、ステレオカメラ画像、カメラ内部・外部パラメータ)
- 2 次 DB
ロボット経路データに対し外れ値除去、データ補間を実施し、絶対時刻を参照してコレクションを統合したデータ
- 3 次 DB
LOAM を実行し、点群の外れ値除去とオペレータ点群データを除去した後の 3 次元点群地図データ。各地図データは PCD ファイルとして保存。
- 3.5 次 DB
3 次 DB 中の地図データを、ある設定した範囲で切り出し、ユーザが定めたファイル数間隔で合成した 3 次元点群地図データ

• 4 次 DB

合成した 3 次元点群地図データを元に作成した 2 次元グリッド地図データ(yaml ファイルと pgm ファイル)。2 次元グリッドマップへの変換は ROS ノードを使用

• 5 次 DB

3 章で述べた手法で生成した色付き 3 次元点群地図データ

RDR 内では 1 次 DB はデータ格納用に MongoDB を使用し、以降の DB では検索用に PostgreSQL を使用している。また、1 次 DB から 2 次 DB の間には、1.1 次、1.2 次、1.5 次 DB が存在し、各 DB 間で外れ値除去や補間を実施している。2 次 DB から 3 次 DB の間で行われるオペレータ点群除去は、例えば図 1 の台車ロボットを人力で押す場合、台車を押す人が地図データ内に混入するので、それを除去するようにしている。1-3 次 DB 間の各処理の詳細については、山田等(2020)[10]が参照可能である。

〈4-2〉RDR 生成地図の利用例

図 9 に示すように、本テーマでは実際に RDR 内で生成され、4 次 DB 中に格納された 2 次元グリッドマップを使用して、ロボットの自律移動のデモを実施した。ここで、地図用の入力データは RTF の会津大学オフィス内(南相馬市)で取得し、会津大 LICTiA に設置されているロボット地図用 RDR(図 9)に送信している。地図データ取得と自律移動に使用したロボット、及び 4 次 DB で生成した 2 次元グリッドマップを図 10 に示す。

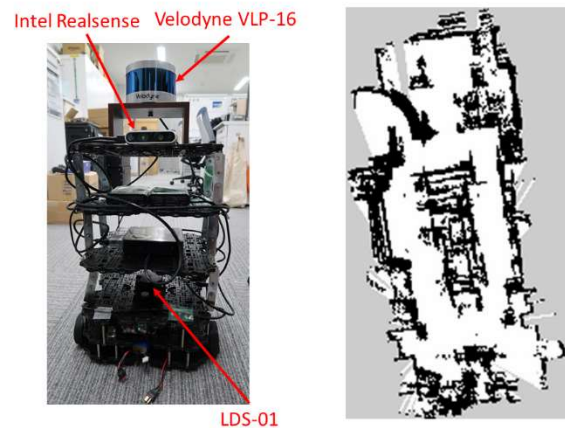


図 10. 自律移動ロボットと RTF 会津大オフィスの 2 次元グリッドマップ

地図生成・自律移動ロボットは Turtlebot3-Waffle-pi をベースに開発し、地図用の点群データは頭部の Velodyne VLP-16 を用いて取得した。2 次元グリッドマップを用いての自律移動は、ROS で公開されているロボット自律移動用パッケージ navigation stack 中の move_base や amcl 等のノードを活用し

て実施できるようにしている。デモにおいては、実際に RTF 会津大オフィスでロボットを制御するホスト PC 内に RDR から図 10 に示す 2 次元グリッドマップをダウンロードした。そして、グリッドマップ中で複数の Way points の座標を指定して、ロボットが Way points に沿った自律移動を行う事を確認することができた。

5. 今後の課題

本研究では、災害地域でロボットがクラウド内に格納した地図データを利用して、自律的に活動する事を目指して、3 つの研究テーマを推進してきた。目標達成のために、各テーマにおける今後の課題を記載する。

(1) LIDAR+カメラキャリブレーション

本テーマを通して、高精度のデータフュージョンを実現するカメラ外部パラメータを得るには複数のキャリブレーション体を様々な位置に設置する事が有効である事が分かった。今後、多数のキャリブレーション体を扱うには、LIDAR 点群とカメラ画像の両方で、そのキャリブレーション体を自動で検出し、マッチングさせる事が重要になってくる。また、自動検出やマッチングのために最適なキャリブレーション体を調べる事も重要な課題となる。

(2) 3次元広域データフュージョン地図の生成

本文中に記載したよう、不整地で広域の 3 次元データフュージョン地図を正確に作成するには、ループ閉じ込み機能や IMU によるオドメトリ補正が使用可能な LeGO-LOAM [11] 等の新しい LIDAR-SLAM アルゴリズムの適用が必要となる。また、色付き点群の復元範囲を拡張するには、台車の側面方向もカバーできる複数のカメラの使用も重要となる。加えて、現在は、LIDAR の点群ベースの地図であるため、特に遠方での解像度が粗く、不整地の細部の凹凸や障害物を 3 次元地図上に完全に復元できていない。複数台の LIDAR の使用や、ボクセル化やメッシュ化による地図の解像度の改善も重要な課題となってくる。

(3) 地図利用のためのロボットクラウドの開発

現状、RDR からダウンロードした 2 次元グリッドマップを使用しているロボットの自律移動は可能となったが、これを不整地に適用するには、RDR 内で作成した 3 次元データフュージョン地図を自律移動に適用可能とする事が、大きな研究課題となる。また、現状は、ホスト PC とロボットとはローカルネットワーク内での接続に限っているので、遠隔地からのロボット制御を可能にするには、インターネットを経由したロボット通信が必要となってくる。そこで、現在、mqtt_bridge を介した遠隔地からの ROS トピック通信を行えるシステムの研究を実施している最中である。

6. まとめ

本研究は 2018-2020 年度に実施している StageII 産学連携ロボット開発支援事業の枠組みで実施した。現在、災害地域でロボットがクラウド上に設置された地図データを活用して自律的な移動・作業を行う事を目指して、「LIDAR+カメラキャリブレーション」、「3次元広域データフュージョン地図生成」、「地図利用のためのロボットクラウド開発」の 3 つのテーマを企業との連携で進めている。ここまでの研究で、LIDAR+カメラキャリブレーションの評価方法の確立と最適な手法の提示、LIDAR+カメラデータを用いた 3 次元データフュージョン地図生成手法の構築を行い、ロボットクラウド (RDR) 中の地図を用いたロボット自律移動まで行えるようになった。今後、実際の災害地域に適用できるよう、RTF の不整地フィールドを活用しつつ、3 つの研究テーマを機能的に進めていく予定である。

文 献

- (1) Engel J, Schöps T, and Cremers D: "LSD-SLAM: large-scale direct monocular SLAM", European conference on computer vision (ECCV), 6-12 September, pp.1-16 (2014)
- (2) Zhang J and Singh S: "LOAM: lidar odometry and mapping in real time", Robotics: science and system conference (RSS), 12-16 July, pp.1-19 (2014)
- (3) Zhang Q and Pless R: "Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)", International conference on intelligent robots and system (IROS), 3, pp.1-6 (2004)
- (4) Scaramuzza D, Harati A, and Siegwart R: "Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes", International conference on intelligent robots and systems (IROS), 29, October, pp.1-6 (2007)
- (5) Park Y, Yun S, and Won Chess S: "Calibration between color camera and 3D LIDAR instruments with a polygonal planar board", Sensors, 14, pp.5333-5353 (2014)
- (6) Velas M, Spanel N, Materna, Z, and Herout A: "Calibration of RGB camera with Velodyne LiDAR", WSCG 2014 communication papers proceedings, pp.1-10 (2014)
- (7) Fischler MA and Bolles RC: "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Commun ACM 24, 6, pp.381-395 (1981)
- (8) Yamada R, Nakajima N, and Yaguchi Y: "Evaluation method of calibration for data fusion of the camera images and laser point cloud and appropriate deployment of the calibration boards", Proceeding of Artificial Life and Robotics 2021, pp.1-6 (2021)
- (9) Yamada R and Yaguchi Y: "Evaluation of calibration method to construct a 3-D environmental map with good color projection using both camera images and laser scanning data", Artificial Life and Robotics, 25, pp.434-439 (2020)
- (10) 山田竜平、丹内智博、矢口勇一、鈴木教文、菊地浩之、成瀬継太郎: 「3次元地図データを利用可能なロボットクラウドシステムの開発」, ROBOMECH 2020 予稿, pp.1-4 (2020)
- (11) Shan T, and Englot B: "LeGO-LOAM: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain", 2018 IROS, October 1-5, pp.4758-4765 (2018)

4.6. 3次元シーンの取得における動的視差法と Lidar 法との比較について

会津大学 岡 隆一 島 圭佑

概要：一般のシーンからの3次元距離情報は、従来 Lidar などの active sensor あるいは、stereo vision によって取得されてきた。著者らは、車やロボットなどに搭載された単眼カメラの動画像から、3次元動画像を取得する「動的視差法」を提案している。現在、すでに公開されている距離のデータに「KITTI データセット」がある。これは、車載の Lidar によって走行中のシーンについて、計測点における距離情報が付加されたものである。このデータセットでは走行中の外界シーンについて距離を取得した際の動画も同時に公開されている。そこで、同じ動画から、「動的視差法」によって、距離動画像を作成し、「KITTI データセット」の距離動画像と対応する pixel レベルにおいての比較を行いたい。それにより、「動的視差法」による、自動運転や自律ロボット、VR のための 3D シーンデータの自動作成への利用可能性を探りたい。

1. はじめに

我々はすでに、単眼カメラからの動画像を用いて動くシーンの各フレームの画像について、すべての pixel に(1) RGB の texture と、(2) カメラからの外界物体表面点までの距離を与える「動的視差法」と呼ぶべき方式を提案している[1].

既存の距離情報の取得手段として、Lidar 等の active sensor があるが、その取得距離データは、後述するように、シーンの他の RGB 画像や動きの情報との統合処理を必要とするなど課題を抱えている。

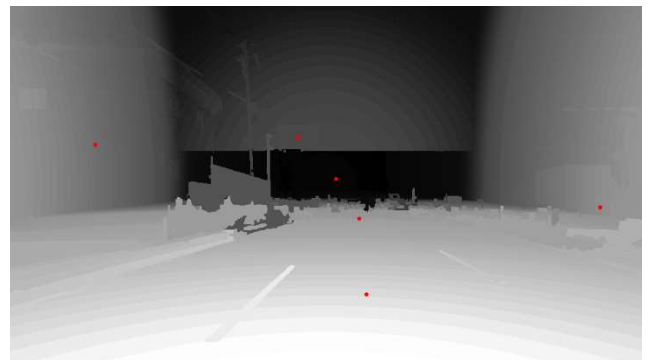
また、近年、VR の発展により、3次元データの作成を手動ではなく、簡便に作成することが望まれている。そこにおいては、自然の風景やシーンについて、色情報を含めての3次元データの取得を行う技術が求められている。

ここでは、自然風景の複雑なシーンからの動画のすべてのフレームのすべての画素について距離を与えるという困難な課題がある。関連研究として後述するように、画像から距離情報抽出の研究は数多くある[2,3,4]が、近年、Deep Learning (DL) を用いた動画からの距離画像の検出に、Google などが研究を活発化しており[5], DL の最先端の研究テーマの1つとなっている。

2. 動的視差法で計測される距離の精度



(a)



(b)

図1 車載カメラからの動画像の1つのフレーム画像の6つのサンプル pixel の位置を赤の四角で示し(図1-(a)), この6つのサンプル pixel において検出されたカメラからの距離を cm 単位で示す。図1-(b)は距離値を明暗画像で示す。図1-(a)の距離値は図1-(b)の対応する pixel を示す。

表 1 Lidar 法と動的視差法の項目別比較一覧表

	測定デバイス	画像の Full pixel で距離がとれるか?	対象物体の pixel に RGB がとれるか?	対象物体の色に影響されるか?	対象物体の動きに影響されるか?	対象物体の反射率や texture に影響されるか?	搭載物の振動に影響されるか?	世界モデル (拘束) の導入	Ground truth がとれるか?
Lidar 手法	レーザ光線	とれない。計測されない pixel が多い。	とれない。カメラ映像との整合処理を要する。	黒い車体、緑の木の葉、道路の白線 (背景光に影響される) など、色により劣化する。	回転ミラーのスキヤンによる計測の空間位置ずれ発生する。	乱反射であることが必要である。texture はなくてもよい。	大きく影響する。stabilizer を必要とする。	なし	対象物の色、乱反射、振動なし、静止物などの条件が満たせばとれる。
動的視差法	通常の単眼カメラによる動画	画像の full pixel で距離が計測できる。距離の動画画像が容易にとれる。	距離と RGB の色が pixel-wise にとれる。	影響しない。	影響しない。動く物体についても距離がとれる。	模様のない壁などでは精度劣化する。世界モデルや texture 模様の projection で対処する。	ほとんど影響しない。	精度向上のため、仮想光源、仮想地面などを導入する。	応用にに応じて Ground truth への補正を必要とする場合がある。

図 1-(a) の 6 つのサンプル点におけるカメラからの距離値は、図 1-(a) の画像のすべての pixel において検出された距離値の明暗画像表示である図 1-(b) の赤い四角のサンプル点のものである。図 1-(a) の 6 つのサンプル点 (赤の小さな点で示している) はそのサンプル点で抽出される距離値を示している。このサンプル点の中で、直感と異なるところは「横断歩道」が 462.8 [cm] となっているところである。この値は他の 5 つのサンプル点の距離値と比較すると、実際より近い距離値を示しているように見える。このように現在ではまだ不自然な距離値を示すところが皆無ではなく、補正の処理アルゴリズムを必要としているといえる。また、画面右方の対向車の距離は実際よりカメラに近い距離値を検出する。これは前方に進行する自車の速度と対向車の手前にくる速度が加算され、これにより optical flow がより大きな値を発生するためである。この影響は高速の対向車でもないかぎり、大きく影響しないが、このような効果が存在することは注意する必要がある。一方、前方にある先行車については、速度の方向が自車と同一方向であることによる optical flow の大きさの減少があることも考慮する必要がある。

一方で、厳密な精度を要求されない応用もありえる。例えば、3D 動画の配信サービスや、XR などの 3D データ空間の作成など、実際の利用において人が許容できる誤差の範囲があり、その状況では現在の精度でも実用に供することができる。

動的視差法の計測距離を ground truth の距離を与える Lidar 法の距離データで、汎用に補正するアルゴリズムについては 7 章で述べる。Lidar の結果を ground truth と先見的にみなすことは必ずしもできない。なぜなら、Lidar を搭載した車では道路状況で振動が発生し、そのブレが Lidar 計測に影響する。また、対象物が黒や緑、また反射が乱反射でない場合、良好に距離がとれないためである。

3. Lidar の距離データと動的視差法との比較

まず、シーンからの距離取得において、Lidar 法と、動的視差法 [1] との全般的違いを表 1 に示す。次に、動的視差法と Lidar 法により取得される距離の比較を行うために、Lidar 法による取得距離として、公開されてよく使われる「KITTI データセット」 [20] を用いるとする。この「KITTI データセット」には車に搭載した Lidar による frame-wise の距離画像と同時に、同期したシーンの frame-wise のカメラからの動画も入っている。したがって、動的視差法の方式をこのカメラからの動画に適用することで、動的視差法による距離動画が作成できる。これによって、2 つの距離シーンの比較ができることになる。これらの結果をまず示す。



図 2 動画における one shot の RGB の frame 画像 (上 1/3 の部分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗 (256 階調) 画像 (上から 2 番目の 1/3 の部分) を示す。

図2では、動的視差法による距離画像(上から3番目の1/3の部分)を示す。明暗図では色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この Lidar の画像において、茶色で示された pixel は距離が計測されていないことを示す。また、Lidar では左右の黒色の車体の部分、また右側の木の葉では距離が計測されていないことを示す。さらに Lidar では右側の建物の白壁が計測されていないことを示す。また Lidar では道路においても計測されていない pixel がかなりあることを示している[20]。



図3 動画における one shot の RGB の frame 画像 (左上上半分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗 (256 階調) 画像 (左下半分) と、動的視差法による距離画像 (右下半分) を示す。

図3 下半分の明暗図では、色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この画像は、車が信号で停止している場合である。Lidar 画像では正面にある交差点を渡る自動車の存在が分かりにくい、動的視差法ではそれがとれていることが分かる。ただし、明暗レベルが近くの道路より白く、精度は十分でないと言える。



図4 動画における one shot の RGB の frame 画像 (左上上半分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗 (256 階調) 画像 (左下半分) と、動的視差法による距離画像 (右下半分) を示す。

図4の明暗図では、色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この画像は、車が信号で停止している場合である。Lidar 画像では正面にある交差点を渡る自動車の存在が分かりにくい、一方、動的視差法でもそれが明確でないが、これは距離が遠い場合、明暗レベルが暗く表現され見えなくなっている可能性がある。また、動的視差法で、木の葉は距離がとれているが、道路上の影が距離に影響している。



図5 動画における one shot の RGB の frame 画像 (左上上半分) とこの frame において Lidar によって計測された距離の明暗 (256 階調) 画像 (左下半分) と、動的視差法による距離画像 (右下半分) を示す。

図5の明暗図では、色が白いほど Lidar またはカメラからの距離が近いことを示す。この Lidar の画像において、茶色で示された pixel は距離が計測されていないことを示す。また、Lidar では左右の黒色の車体の部分、また右側の木の葉では距離が計測されていないことを示す。さらに Lidar では右側の建物の白壁が計測されていないことを示す。また Lidar では道路においても計測されていない pixel がかなりあることを示している。一方、右下の動的視差法では、道路の両脇が道路より明暗レベルが白く、つまり、距離がより近く表現されており、正確な距離が計測されていないことを示している。

4. Lidar 法距離による動的視差法距離の補正

〈4.1〉補正アルゴリズム

いま、Lidar 法による距離測定が ground truth であると仮定する。Lidar による距離測定であってもその搭載車が道路状況で振動する場合や、回転ミラーでレーザ光を scan する場合の車の速度による変動などにより ground truth とならない場合がある。ただ、本稿では Lidar 法測定による距離を ground truth として、動的視差法の距離値をそれに補正する方法を示す。

動画において、ある固定区間長を考える。その区間長における Lidar の frame 画像の pixel について、計測値がとれたもの (すなわち、図3、図4、図5で、Lidar による取得で明暗画像化されたもので、茶色の pixel 以外のもの) をとりだし、その pixel の距離値の集合を $V = \{(x, y, t) : (x, y) \in (X, Y, t)_{distance}, t_{start} \leq t \leq t_{end}\}$ 、ここで $(X, Y, t)_{distance}$ は時刻 t において Lidar で計測値が存在する座標群とする。また、動的視差法における距離値 $g(x, y, t)$ について、 $W = \{g(x, y, t) : (x, y) \in (X, Y, t)_{distance}, t_{start} \leq t \leq t_{end}\}$ となる距離集合を考える。ここでは、Lidar と動的視差法の距離の意味するものは同じとされる。いま、 V における $f(x, y, t)$ の値を量子化し、整数の値域を $[1, I]$ とし、同様に、 W における $g(x, y, t)$ の値の量子化値域を $[1, J]$ とする。値域における区間 $[1, I]$ における点 f をもつ pixel の頻度を $F(f)$ とし、同様に区間 $[1, J]$ における点 g における pixel の頻度を $G(g)$ とする (図6を参照)。次に、 $F(f), G(g)$ の2つの分布について、

区間 $[1, I]$ と区間 $[1, J]$ の両端が対応するとして、両端固定の Dynamic Programming を行い、座標点 (I, J) で得られた最適累積値から最適の経路を back tracing することで、 $[1, I]$ にある f^* に対応する $[1, J]$ にある g^* が得られる。このとき、 f^* は、Lidar の距離値であり、それに対応する動的視差法の距離値は g^* であることになる。この対応関係をつかうと、動的視差法で得られた距離値は Lidar の距離値へ変換可能となる。

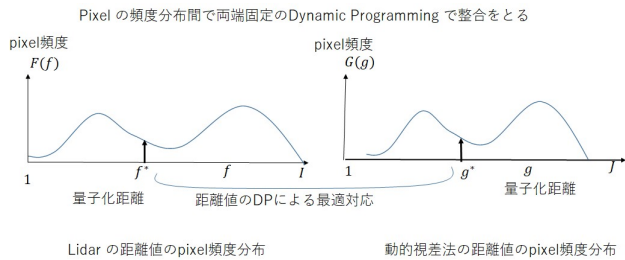


図 6 2 種類の距離のヒストグラムへの動的計画法適用によって、動的視差法の距離を Lidar の距離によって補正を行うアルゴリズムの説明図

〈4・2〉補正アルゴリズムの汎化

前記の Lidar 距離値と動的視差法の距離値の対応関係が、十分な量のデータによって一度作成されれば、その対応関係を使うことによって、任意の動画からの動的視差法の距離についても、Lidar 距離データが取得されない状況でも、Lidar 距離で補正されることになる。つまり、両者の対応関係の汎化を考えることになる。

5. おわりに

本稿では、シーンの距離測定でよく使われるレーザ光を用いた Lidar 装置による距離計測結果と、著者らが提案する単眼のカメラの動画から距離計測を行う「動的視差法」による距離計測結果の相違を議論した。それぞれの手法には特徴があり、それぞれの特徴を生かした利用法を考えるいくつかの視点を実験例によって示した。「動的視差法」についていえば、まだ改良課題がありそれも示した。

[1]岡隆一, 橋本康弘, 奥山祐市, 島圭佑: "単眼カメラ搭載移動体からの撮影動画シーンの 3 次元動画像による再構成", Technical Journal of Advanced Mobility, pp. 2-11, Vol. 1, No. 1 (2020) .

[2]Ye Lu, Jason Z. Zhang, Q. M. Jonathan Wu, and Ze-Nian Li : "A Survey of Motion-Parallax-Based 3-D Reconstruction Algorithms", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics Part C: Application and Reviews, (2004).

[3]Furukawa and C. Hernandez : "Multi-View Stereo : A Tutorial. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision", vol. 9, no. 1-2, pp. 1-148, (2013).

[4]鳥居秋彦, 岡谷貴之, 延原章平: "多視点 3 次元復元の研究動向", Vol. 2011-CVIM-176, No. 1, (2011/3/17).

[5]遠藤智則 : " グーグルが深層学習ベースの単眼 SLAM 技術で革新", NIKKEI Robotics, pp. 5-13, July, No. 48, 2019.

[6]岡 隆一: " 3D スマホのソフトウェアによる実現", JST 新技術説明会 (会津大学), 2019. 3. 14.

[7]岡 隆一: "載単眼カメラからの 3 次元動画像の再構成と相対距離特徴抽出", JST 新技術説明会 (会津大学), 2019. 12. 17.

[8]岡 隆一: "動画像距離算出装置および動画像距離算出プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体", 国際出願, PCT/JP2019/13289 (平 31. 3. 27).

[9]岡 隆一: "画像距離算出装置および画像距離算出プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な非一過性の記録媒体 ", 米国出願番号, 15/752, 892 (2018 年 2 月 1 5 日).

[10]岡 隆一: "画像距離算出装置, 画像距離算出方法および距離算出プログラム", 特願 2016-170795(平成 2 8 年 9 月 1 日).

[11]岡 隆一: "動画像距離算出装置および動画像距離算出プログラム", 特願 2019-30904 (平 31-2 月 22 日).

[12]Ryuichi Oka, Keisuke Hata, "Reconstructing a moving 3D image from video captured by a forward-moving camera", MIRU2018, PS3-1, August (2018).

[13]<https://en.wikipedia.org/wiki/Parallax#/media/File:Parallax.gif>.

[14]Vishvjit S. Nalwa, in Chapter 8 of "A Guided Tour of Computer Vision," Addison-Wesley Publishing Company, (1993).

[15]山本正信: "連続ステレオ画像からの 3 次元情報の抽出", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J69-D, No.11, pp.1631-1638, 1986

[16]Tinghui Zhou, Matthew Brown, Noah Snavery, David G.Lowe : " Unsupervised Learning of Depth and Ego-Motion from Video", CVPR 2017.

[17]<https://opencv.org/>.

[18]岡隆一, 島圭介, 橋本康弘, 奥山祐市: "補正距離算出装置, 補正距離算出プログラムおよび補正距離算出方法", 特願 2019-217358 .

[19]"センサーフュージョン技術の開発と応用事例," 技術情報協会, 2019 年, 1 月, ISBN978-4-86104-736-7 C3055.

[20]The KITTI Vision Benchmark Suite:
http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/raw_data.php

4.7. RT ミドルウェア用 IoT 通信モジュール群の提供と

IoRT システム構築における IoT 通信モジュール採用指針の検討

会津大学 吉野 大志 渡部 有隆 矢口 勇一
中村 啓太 成瀬 継太郎

概要：In Stage II, we developed new communication modules based on MQTT, AMQP and MQTT-SN to build IoT systems using RT-middleware. This will allow RT-middleware to be used as a seamless development framework for IoT systems, which are complex systems that include robot systems. This report presents the characteristics of each communication module and examines the adoption criteria for each IoT communication module in order to optimize the IoRT system. Among these modules, MQTT is a simple protocol that is easy to implement in the field, and we were able to apply it to the development of an actual system in Stage II. In the future, we will go beyond the framework of RT systems and aim to construct an IoRT system based on the cooperation of heterogeneous systems using the next-generation OpenRTM-aist.

1. はじめに

近年、ロボットによる新たなサービスを生み出す可能性を秘めたロボットのインターネット活用 IoRT (Internet of Robotic Things) が注目を集め、各所で研究開発が活発化している。クラウドロボティクスに代表される IoRT システムは主に、ロボットやセンサー等のデバイス、クラウドインフラストラクチャ、これらを結びつけるネットワークの3つで成立するシステムオブシステムズである。通常、各要素ではそれぞれに最適化された通信プロトコルやミドルウェアが選択された上で、各要素システムが構築される。このように要素毎に異なるソリューションが採用される IoRT システムでは、システムが大規模化するほど開発が煩雑になり、ソフトウェア資源の管理やシステムの運用も複雑化する。

各要素システムで採用されているソリューションを統一化し、IoT (Internet of Things) や IoRT 等の複合システムを総合的に開発かつ管理可能なフレームワークとして、RT ミドルウェアが挙げられる。RT ミドルウェアはロボット用のシステム構築ミドルウェア⁽¹⁾だが、ロボットシステムを構成する RTC (RT コンポーネント) は PIM (Platform Independent Model) として OMG (Object Management Group) にて標準化されており、データ交換用の通信インタフェースを特定化していない⁽²⁾。つまり、通信インタフェースはロボットシステム用にも特化可能であり、IoT システム用にも特化可能である。これらの異なる通信インタフェースを同時に備えた RTC は、Gateway として各要素システムをつなぐ役目を担う⁽³⁾。これにより、RT ミドルウェアで構築される RT システムのみで IoRT システム全体を表現可能になる。

Stage II の産学連携ロボット研究開発支援事業では、RT ミドルウェアを IoRT システム構築用のフレームワークとして活用できるように、主に RT ミドルウェアのリファレンス実装である OpenRTM-aist⁽⁴⁾用の拡張通信モジュールを3種類開発した。これらはすべて IoT 系の通信モジュールだが、それぞれ特徴が異なることから、満たすべきシステム要件により採用される通信モジュールも異なってくる。本報告書では、各通信インタフェースの特徴を示すとともに、システム構築における通信インタフェースの採用指針を提案する。これを踏まえて、OpenRTM-aist 用 IoT 通信モジュールで実際に構築されたシステムを取り上げ、既実践活用レベルで本事業に貢献できていることを示す。そして最後に、現行の通信モジュールにおける課題が、次期リリース予定となっている OpenRTM-aist ver.2.0 で解消可能となることを示しつつ、今後の研究活動の方向性を展望する。

2. OpenRTM-aist 用 IoT 通信モジュールと特徴

Stage II で開発した IoT 通信モジュールは以下の3種類となる。

- A) MQTT 通信モジュール (C++版と Python 版)⁽⁵⁾
- B) AMQP 通信モジュール (C++版)⁽⁶⁾
- C) MQTT-SN 通信モジュール (C++版)⁽⁷⁾

通信モジュールはそれぞれ、MQTT (Message Queuing Transport Protocol) ver. 3.1.1⁽⁸⁾、AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) ver. 0.9.1⁽⁹⁾、MQTT-SN (MQTT for Sensor Networks) ver. 1.2⁽¹⁰⁾の各 IoT 通信プロトコルをベースに実装されている。この内、A)の Python 版 MQTT 通信モジュールはソースコードとドキュメントを GitHub リポジトリにて公開済みである⁽¹¹⁾。その他の通信モジュールも今後公開していく予定となっている。

〈2・1〉 IoT 通信モジュールの通信構造

RT ミドルウェア上で、IoT 通信モジュールを適用した RT システムの通信構造を Fig. 1 に示す。A)~C)の IoT 通信モジュールは、Message Broker 付きのメッセージングモデルを採用している、という点で共通している。Message Broker 付きのメッセージングでは、メッセージ送信者と受信者の各クライアントが、メッセージの中継サーバである Message Broker に接続し、Message Broker を通じてクライアント間でメッセージ交換を行う。すなわち、Message Broker 付きのメッセージングでは、クライアントからサーバへのコネクションを利用することで、クライアント - サーバ (Broker) 間の双方向通信を可能にしている。このため、クライアントは NAT (Network Address Translation) 機構の内側のローカル環境にあっても、Firewall にてインバウンド通信が制限されていても、サーバに接続可能な状態であればクライアント間のデータ送受信は成立する。例えば送信者と受信者の各クライアントが各々別のローカルネットワークにあっても Broker を経由したメッセージ交換は可能となる。このように IoT 通信モジュールは、連続したデータの送受信を担うデータポートを介した RTC 間の接続を促し、インターネット上におけるシステム拡張性の向上に寄与する。

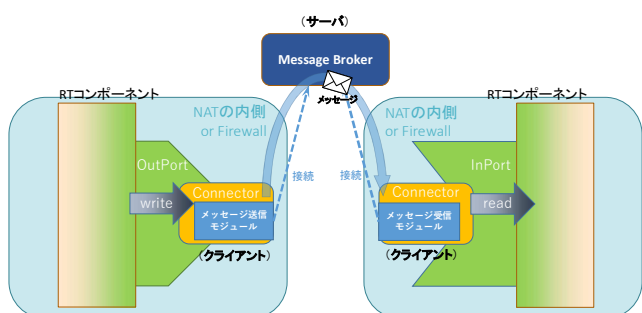


Fig. 1. Communication architecture of RT system with IoT communication modules.

実際に RT ミドルウェア上で IoT 通信モジュールを使用するには、OpenRTM-aist における外部モジュールの動的ロード機能を用いる。これにより、データポートに対して新規に通信インタフェースを追加することができる。OutPort 側にメッセージ送信モジュール、InPort 側にメッセージ受信モジュールの各 IoT 通信モジュールがロードされると、MQTT 等の IoT 通信インタフェースが利用可能な状態になる。ただし、メッセージ交換には別途サーバとなる Message Broker が必要となる。サーバは各種 IoT 通信プロトコルをサポートしているオープンソースのソフトウェア Broker をエンドユーザ自ら用意しても良く、AWS IoT Core のような IoT プラットフォームのメッセージ交換サービスを利用しても良い。オープンソース化済みの A)におけるセキュア通信対応 MQTTS (MQTT Secure) 通信インタフェースであれば、AWS IoT Core を介したデータポート間のメッセージ交換が可能となっている。さらに JSON シリアライズ版の MQTTS 通信モジュールであれば、AWS における他のクラウドサービスとの連携も図れる⁽¹¹⁾。

〈2・2〉 IoT 通信モジュールの特徴比較と IoT システム構築時の IoT 通信モジュール採用指針

各 IoT 通信モジュールの最も大きな違いは IoT システムにおけるカバー可能な範囲にある。IoT システムの概観は Fig. 2 に示した通りで、IoT システムはインターネットを挟んだクラウドを構成するインフラストラクチャ領域と、ロボットやセンサー等の IoT デバイスを含むフィールド領域に大きく分かれる。この中で、MQTT と AMQP は IoT システム全域をカバーできるのに対し、MQTT-SN はフィールド側のデバイス間通信に利用されるセンサーネットワーク上のサブシステムのみカバーするに留まる。つまり、MQTT-SN はインターネット上のシステム構築には適用できない。これは、MQTT と AMQP が TCP/IP オーバーレイのアプリケーション層プロトコルであるのに対し、MQTT-SN が UDP 等の非 TCP/IP をベースとしたアプリケーション層プロトコルであることに起因する。

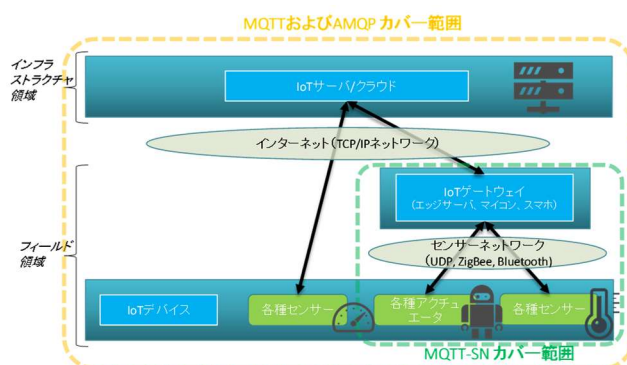


Fig. 2. Standard Components of IoT Systems.

以上を踏まえた上で、各 IoT 通信プロトコルの主だった特徴を Table. 1 にまとめる。この中で MQTT と AMQP は IoT システム全域をカバーするプロトコルであるが、その機能や特徴は対照的で、目指すべき IoT システムの方向性も異なっている。

MQTT はシンプルなプロトコル仕様となっており、クライアント - サーバ (Broker) 間のプロトコルシーケンスが簡潔な上に、メッセージ中のヘッダサイズが最小 2 バイトと小さいことから、軽量メッセージングが可能となっている。特にメッセージ中の payload が小サイズなほど通信パフォーマンスの向上に寄与する。このことから MQTT 通信モジュールは、フィールド側のロボットを含む IoT デバイスにおいて、マシンリソースが乏しく省電力を前提条件とする場合や、メッセージングの品質よりも通信パフォーマンスを重視する場合に選択候補の一つとなる。これに加えて、今回調査した大手ベンダが提供しているすべての IoT プラットフォームで MQTT をサポートしていることから、ベンダ提供のクラウドサービスとの連携を図りたい場合に MQTT 通信モジュールが役立つ。

一方、AMQP は MQTT と比較してプロトコル仕様が複雑

Table 1. Feature comparison among MQTT, AMQP, and MQTT-SN.

	MQTT ver. 3.1.1	AMQP ver. 0.9.1	MQTT-SN ver. 1.2
IoTシステムにおけるカバー範囲	IoTシステム全領域	IoTシステム全領域	フィールド領域におけるセンサーネットワーク上のサブシステム
ベースプロトコル	TCP/IP	TCP/IP (信頼性の高いトランスポート層プロトコルを前提)	非 TCP/IP (ex. UDP, ZigBee, Bluetooth)
メッセージングの特長	シンプルかつ軽量	高信頼かつ高機能	MQTT 以上にシンプルかつ軽量
Broker におけるメッセージルーティング	Topic ベースのシンプルなメッセージルーティング	Topic ベースも含めた高度で多様なメッセージルーティング	Topic ベースのシンプルなメッセージルーティング
Broker の出力側における Queue の規定の有無	プロトコル上の Queue の規定はなし。ミドルウェア実装上は Queue を設ける場合もあり	基本的に、一つの受信クライアントに対して一つの Queue がユニークに紐づけられる (メッセージの順序保証)	プロトコル上の Queue の規定はなし。ミドルウェア実装上は Queue を設ける場合もあり
メッセージングの品質保証	クライアント-サーバ (Broker) 間の確認応答 (ACK) に留まる。	トランザクション制御により、クライアント間のデータ送受信の一連の流れを同期的に処理可能 (メッセージの到達保証)	クライアント-サーバ (Broker) 間の確認応答 (ACK) に留まる。ただし、QoS=1 の場合はコネクションレス通信のため確認応答もなし
セキュリティに関する規定の有無	認証と暗号化に関する規定あり	規定はあるが、認証と暗号化に関する規定はなし。ver. 1.0 にはあり	規定なし
コネクションレス通信	なし	なし	QoS=1 の場合に、ブロードキャストによるコネクションレス通信が可能
サーバ検索機能とサーバの存在通知機能	なし	なし	サーバとなる Gateway や Broker の検索機能と、クライアントに対するサーバの存在通知機能あり
プロトコルをサポートしている IoT プラットフォーム	AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Google IoT Core, Watson IoT Platform	Azure IoT Hub	なし
標準化への対応	OASIS 標準かつ ISO/IEC 国際標準	OASIS 標準。ver. 1.0 は OASIS 標準かつ ISO/IEC 国際標準	なし

な分、高機能で信頼性の高いメッセージングを得意とする。

AMQP では Topic ベース以外のメッセージルーティングもいくつか用意されている上に、Broker におけるクライアント間の関係付けと、これに適用するルーティング形式が各々独立していることから、より複雑なメッセージの流れを表現できる。信頼性の点においても、プロトコルレベルでメッセージの順序保証および到達保証がなされており、特に出力側における Queue の規定はメッセージを永続化し、例えば Broker が障害により停止したとしても Queuing 済みメッセージはロスしない。以上、高機能で高信頼という点から、AMQP はより細かいメッセージングの制御が必要となるシステムや、ミッションクリティカルなシステム構築に向いていると言える。しかし、その一方でメッセージング処理は重くなるため、マシンリソースの乏しい IoT デバイスでの使用は若干の注意を要する。

MQTT と AMQP に対して、MQTT-SN はフィールド側センサーネットワーク上のサブシステム構築用プロトコルであり、TCP/IP ネットワーク上のシステムとの連携を図るには、必ず IoT Gateway を介した MQTT-SN と MQTT のペアで使用しなければいけない。当然、IoT システムとはせず、MQTT-SN によるセンサーネットワーク内だけのローカルシステムとして完結することも可能だが、プロトコル上セキュリティに関する規定がなく、ローカルネットワーク上でもセキュア

通信が必要条件となるシステム構築には向かない。セキュア通信の確保が難しい一方で、プロトコルは MQTT からさらにシンプルな仕様にまとまっており、UDP ベースのクライアントライブラリを用いれば MQTT 以上の通信パフォーマンスが期待できる。さらにブロードキャストによるコネクションレス通信も可能で、接続のシーケンスが省略される分、さらなる通信効率の向上に一役買う。これに加えて MQTT-SN では、クライアントのサーバ検知機能やサーバのクライアントに対する存在通知機能があり、クライアントは事前にサーバを認識しておく必要がない。これは移動することで絶えず位置が変わるロボットシステムにおいては、利用可能となるサーバも時々刻々と変わることから欠かせない機能と言える。

3. MQTT 通信モジュールの活用事例

前章で詳述した通り、各 IoT 通信モジュールのベースとなっている通信プロトコルは IoT システム中でカバーしているレイヤーも、重視するシステム特性も異なるため、事案ごとに最適な IoT 通信モジュールが選択されるべきである。しかしながら、この中でも MQTT は IoT 通信プロトコルの国際標準として世界的に広く認知されており、プロトコルもシンプルで導入しやすいことから、IoT ソリューションのデファクトスタンダードとなりつつある。そこで我々は産学連携ロボット研究開発支援事業の連携企業に MQTT 通信モジュール

を活用いただくべく、他の通信モジュールに先立ちオープンソースとして公開するに至った。Stage II 最終年度では、連携企業のアクアクルー株式会社、株式会社東日本計算センター、ならびに株式会社社会津ラボに、IoT システム構築における各社システムの連携の要として本モジュールをご活用いただいている。その一例となる IoT システムの概観を Fig. 3 に示す。こちらはアクアクルー管理下の上下水道関連システムと、東日本計算センター管理下の会津大学 LICTiA クラウド上に展開された DB (データベース) サーバ間のデータ交換ソリューションとして本モジュールが採用された事例となる。本事例は、システムの構成要素であるフィールド側 RTC とクラウド側 RTC それぞれに MQTT 通信インタフェースを設け、フィールド側下水道関連データのデータ交換をインターネット上の MQTT サーバ経由で行い、クラウド側で受信したデータを DB に保管するシステムとなる。

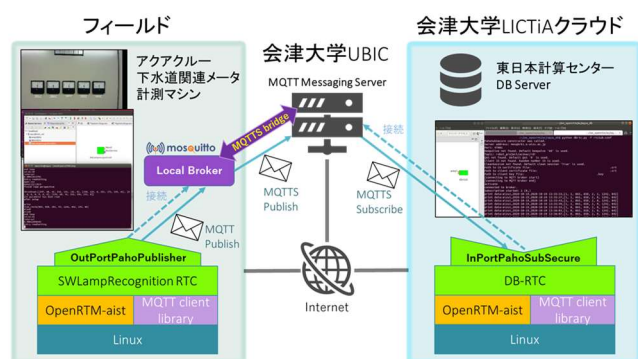


Fig. 3. Overview of the actually constructed IoT system on OpenRTM-aist.

4. IoT 通信モジュールの現状の課題と OpenRTM-aist ver. 2.0 への期待

現行の OpenRTM-aist ver. 1.2 版 IoT 通信モジュールは、MQTT 通信モジュールを除き、CORBA で用いられているシリアライズ形式でのデータ交換のみに対応している。このため、通常は RT システムと、別のシリアライズ形式を採用している外部の IoT システム間の連携を取ることはできない。しかし、次期リリース予定となっている OpenRTM-aist ver. 2.0 では、通信モジュールからシリアライズモジュールが分離され、各通信プロトコルに適合したシリアライズを選択できるようになる。これに先んじて我々も ver. 2.0 版 IoT 通信モジュール用のシリアライズを 2 種類開発している⁽¹²⁾。これらを用いることで、RT システムと外部 IoT システムとの相互運用性が加速し、既存システムの再利用性も促せる。このように OpenRTM-aist ver. 2.0 では RT システムと IoT 含む異種システム間の連携が容易になることから、ひいては既存システムの再利用による開発コストの削減をもたらし、ソフトウェア資源の有効活用にもつながることが期待される。

5. おわりに

本稿では、Stage II における研究成果として OpenRTM-aist 用の IoT 通信モジュールの開発と応用について取り上げた。各 IoT 通信モジュールの特性は異なり、これらを駆使することで多様なシステム要件に耐えうることがわかった。特に MQTT は世界的な応用事例が多く、MQTT 通信モジュールを用いれば世界に点在する MQTT システムと RT システムをつなげられるポテンシャルを有する。今後は RT システムと IoT プラットフォームにおけるクラウドサービスとの連携を視野に入れ、実例を示すことで異種システム間のサービス統合に取り組んでいきたい。これを示すと同時に異種システム統合フレームワークとしての OpenRTM-aist に注目し、今後さらなるロボットミドルウェアの応用可能性について見定めていく所存である。将来的には、これをもって地域社会の課題解決につながるができるよう努めて参りたい。

文 献

- (1) N. Ando, T. Suehiro, K. Kitagaki, T. Kotoku, and W. K. Yoon, "RT-middleware: distributed component middleware for RT (robot technology)," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2005), pp. 3555-3560, 2005
- (2) Object Management Group (OMG), "Robotic Technology Component Specification version 1.1, formal/12-09-01," Accessed: 4 February 2021, [Online]. Available: <http://www.omg.org/spec/RTC>
- (3) 吉野 大志, 渡部 有隆, 矢口 勇一, 中村 啓太, 成瀬 継太郎: "異種システム統合 Gateway RT コンポーネントの Kubernetes によるプラットフォーム化", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 (ROBOMECH2020), 2P1-G02, 2020
- (4) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), OpenRTM-aist official web site, Accessed: 4 February 2021, [Online]. Available: <https://www.openrtm.org/>
- (5) 吉野 大志, 渡部 有隆, 矢口 勇一, 中村 啓太, 成瀬 継太郎: "OpenRTM-aist 用 MQTT 通信モジュール群と Mosquitto MQTT broker の組み合わせによる IoT システムの構築方法", 第 21 回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 (SI2020), 1S1-05, 2020
- (6) 吉野 大志, 渡部 有隆, 矢口 勇一, 中村 啓太, 小川 純, 成瀬 継太郎: "高信頼性 IoR システム実現のための RT ミドルウェア用 AMQP 通信インタフェース", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 (ROBOMECH2019), 2A1-M09, 2019
- (7) 吉野 大志, 渡部 有隆, 矢口 勇一, 中村 啓太, 小川 純, 成瀬 継太郎: "IoR システム構築のための RT ミドルウェア用 MQTT および MQTT-SN 通信インタフェース", 第 19 回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 (SI2018), 1C1-08, 2018
- (8) Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS): "MQTT version 3.1.1," Accessed: 5 February 2021, [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- (9) AMQP Working Group, "AMQP Version 0.9.1 Protocol Specification," Accessed: 5 February 2021, [Online]. Available: <http://www.amqp.org/sites/amqp.org/files/amqp0-9-1.zip>
- (10) A. Stanford-Clark and H. L. Truong: "MQTT for Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification Ver. 1.2," Accessed: 5 February 2021, [Online]. Available: http://mqtt.org/new/wp-content/uploads/2009/06/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf
- (11) 吉野 大志: "OpenRTM-aist Python 用 Paho MQTT 通信モジュール", Accessed: 4 February 2021, [Online]. Available: https://github.com/dyubicuoa/OpenRTM_aist_paho_mqtt_interface
- (12) 吉野 大志, 渡部 有隆, 矢口 勇一, 中村 啓太, 成瀬 継太郎: "MessagePack シリアライズまたは Protocol Buffers シリアライズによる RT ミドルウェアの汎用化", 第 20 回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 (SI2019), 3A5-03, 2019

4.8. Cloud-Robotics (CR) Research: Survey for CR Architecture, Architecture for Multicloud Heterogeneous-Robotics, and Stochasticity-aware CR Workflow Scheduling

University of Aizu Akila Siriweera, Keitaro Naruse

Abstract: Robotics engineering is gradually becoming an essential part of our daily life. However, it has been generating Big Data and seeking high computation costs because of the diversified sensors and processing requirements involving heterogeneous robotics and their workflows. Therefore, cloud computing has become the incumbent platform for robotics. Then cloud robotics becomes a preferred and leading research area in robotics. Moreover, the Fukushima robotics test field facilitates the research and testing works of heterogeneous robotics researchers. However, it does not possess an adequate cloud platform for heterogeneous robotics—the reason mentioned above causes duplicating data handling workloads and hinders smooth operations. Therefore, we proposed a cloud robotics architecture for heterogeneous robotics. We also observe that workflow scheduling is one of the critical requirements in cloud robotics. Consequently, we have been working to propose a framework for cloud robotics workflow scheduling.

1. Introduction

Global robot market, which combined industrial and non-industrial (domestic and personal) robots show average 30% growth, and forecasts the demand will reach to \$ 209 billion by 2025.¹ Meanwhile, the demand for the industrial robot market has increased by 61% and non-industrial robots demands increase by 52% compared to the 2017.² This implies, that the robotics field shows exceptional growth in respective highly diversified industries.

Robots involving highly diversified use-cases involving diverse industries (such as aerospace, consumer, disaster response, education, entertainment, exoskeletons, manufacturing-industrial, medical, military, self-driving cars, telepresence, and underwater) and processing requirements are called as heterogeneous-robotics. Therefore, considering the increasing demand for the heterogeneous-robotics and their exponential growth of the demand for the research and developments, Japanese government inaugurated world first and so far the only all in one public heterogeneous-robotics testing field (RTF) at Minamisoma, Fukushima, Japan, which is named as the Fukushima-RTF and it facilitate research, development and testing works of heterogeneous-robotics for international researchers and industries. Fig. 1 outline the services providing by the Fukushima-RTF.

Heterogeneous-robotics are equipped with diverse sensors, and they have been generating enormous data which has been used for diversified use-cases (robots and processing requirements) involving various stages of the robotics workflows. Then cloud computing becomes the refuge to address such high volumetric,

velocity and variety (3V) of Big Data involving robotics workflows. That implies cloud-robotics (CR) and CR architecture have been playing pivotal role in the robotics domain. Therefore, it is essential to establish an all in one platform for the heterogeneous-robots that caters heterogeneous data processing requirements, such as data lake (data acquisition and maintenance) and diverse requirements of processing including analytics of the wide range of robots in Fukushima-RTF. This implies that the due complexity of end-solution for heterogeneous requirements of CR becomes the system-of-system's (SoS).

Moreover, the CR platforms and architectural solutions are common and trending in the field of CR. Therefore, we have done thorough study in literature related to the platforms and architecture for CR platform. For that, we studied existing architectural works under five levels (L1 [1]–[11], L2 [12]–[19], L3 [20]–[37], L4 [38]–[44], and L5 our work with [45], [46]). L1, L2 are system architectures (SA) and framework solutions before and after 2017, L3 is reference architectures (RA) and framework solutions, L4 is RoboEarth and Rapyuta projects, and L5 is literature works discuss about beyond Industry 4.0 next generation CR. According to our requirements, we studied that architectural design process (ADP), provisions for industrial evolution (PIE), and provisions for secured heterogeneity (PSH) are the three of the most important for heterogeneous-robotics platform. From that we learned, there is a considerable gap in next generation works studied ADP, PIE, and PSH altogether. Moreover, top-down (model based) architectural design process is laying solid foundation for the sustainable end-product of the SoS. Therefore, we employed the top-down design approach. Moreover, vast-majority of them are dedicated for a

¹ www.statista.com/statistics/760190/worldwide-robotics-market-revenue

² ifr.org/post/market-for-professional-and-domestic-service-robots-booms-in-2018

domain or specific user-case. In addition to that, architectural solutions for the heterogeneous CR platforms are limited compared to the CR platform. Nevertheless, our objective is to establish a next generation CR platform for the Fukushima-RTF, which caters heterogeneous-robotics requirements. In addition to that, we observed that even though those followed top-down architectural process ad-hock architectural design policy is the key concern of both cases (CR and heterogeneous CR). Then those solutions are not possessing an adequate modelling. Therefore, those are suffering inherent drawbacks of ad-hock approaches, which are strictly domain specific, moreover customizability, adaptability and extendibility are minimized. To address these concerns, we propose a modelling for our architectural design process. That means, our solution is model-driven next generation CR (MNCR) platform (MNCRP).

Moreover, due to the complexity of diverse CR requirements, the total solution of the MNCRP becomes the SoS. Nevertheless, it needs unified architectural framework (UAF) approach for assembling systems in the SoS, i.e. MNCRP. These systems are called as the modules of the framework. In addition to that, the complexity of the MNCR architectures leads to limit the number of available solutions for the heterogeneous approaches. The RA is the one of well-known approach to address the architectural designing issues of SoS, which are technically large and systematically complex problem domains. Therefore, to alleviate the constraints in architectural designing process, first we propose an adequate modelling for the MNCRP. We employed S. Angelov et. al. design principles of proposing a modelling and adapted with necessary extension. The proposed UAF is derived based on abstract normative and non-normative perspectives. Here we called the abstract normative view as the RA for the MNCRP and the abstract non-normative view called as the abstract SA. We employed ArchiMate to develop the RA. We are the very first to propose UAF based SoS, which is MNCRP for the CR.

In addition, we observed that heterogeneous robots' workflows involving cloud platform are experiencing scheduling concerns due to the various QoS (price, time, throughput, latency, availability etc.) constrains in optimal resource allocation. Whereas, CR workflow scheduling (CRWS) is essential in cloud robotics domain for smooth functioning of the robot. Network frequency vs delays shows highly stochastic phenomena. Moreover, deterministic scheduling is the well-known NP-hard, while stochastic scheduling becomes the PSPACE-hard problem [47]. Therefore, first we study on the nature of robotics data communication across the cloud platform. Then we observed that the robotics data communication shows unique stochastic awareness with respective to the communication protocol, bandwidth, and tasks involving robotics workflow. To the best of our knowledge, this the very first fundamental observation in both data communication and robotics. Then based on that fundamental observation, we have been working to propose QoS aware stochastic workflow scheduling for the CR.

Section 2 discusses RA for the MNCRP. In Section 3 gives summary information about the survey for the architecture for CR. Section 4 briefs the CR workflow scheduling. Section 5 conclude the article.

2. RA for MNCRP

This section briefs the proposed RA for the MNCRP. We have detailed modelling for the RA of the MNCRP [48]. Fig. 1 shows the proposed RA.

We employ ArchiMate modelling tool to device the normative representation of the RA for the MNCRP. The ArchiMate is open and independent enterprise architecture modelling toolkit to support the description, analysis and visualization of architecture within and across business domains. The normative M_4^{CR} contains three main layers, which are *physical layer*, *infrastructure layer* and *Analytical layer*. Here below we give brief introduction about the respective layers, components, and connectors. All the main and sub-components of *detailedness*, *concreteness* and *representation* are defined as respective *semi-detailed*, *semi-concrete* and *semi-formal* manner.

The *physical layer*: This layer maintains heterogeneous-robots and end-users of the MNCRP. End-users described in scenario 2 dominate in this layer. All users will use same MNCRP for their heterogeneous CR requirements.

The *infrastructure layer*: This layer dominates by *CR-Eco-Sys*. The *CR-Eco-Sys* comprises collection of framework modules. Those are compelling to accomplish dedicated jobs and those are defined in *semi-formal* manner. *DMC*, *GD-HDFS*, *MUT*, *COE*, *ECB*, *MAA-FE*, *MAA-ME*, *DTMS*, and *ISOW* are respective framework modules proposed in the *CR-Eco-Sys*.

The *analytical layer*: This layer is responsible operations of *MAA-BE*. The *ASC* is responsible to automate all data science related workflows involving the analytics in the MNCRP.

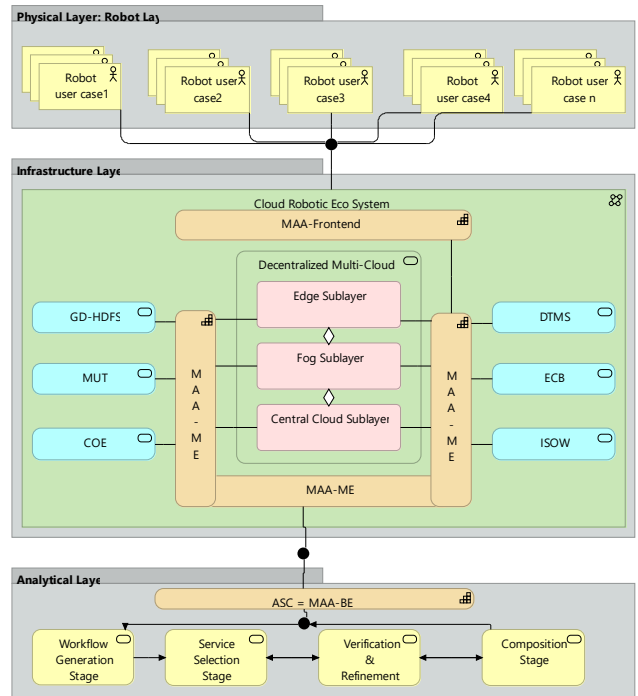


Fig. 1. M_4^{CR} Abstract normative-view - RA for framework for MNCRP

DTMS = Digital twin modeling and simulation, DMC = Decentralized multicloud.
MUT = Middleware for adapting utility technologies, COE = Container orchestration engine,
GD-HDFS = Geo-distributed Hadoop distributed file system, ECB = Extended crosschain for blockchain,
ISOW = Information as service based on domain ontology and web services
MAA = Multiagent for automation, (FE/ ME/ BE = frontend/ middle end/ backend) ASC = Automatic service composition

The *DMC*: This is responsible to maintain the decentralized CR eco system of the MNCRP. The *DMC* comprises edge, fog and central-cloud as three main sub-components.

The *GD HDFS*: This component maintains fault tolerant geo-distributed Hadoop distributed file system facility. That provides provisions for cost effective (due commodity hardware, filesystem shares the hardware with the computation framework as well), scalable, resilient to failure (bounce back effectively) and fault tolerance (operating without interruption) data management.

The *MUT*: This component is responsible to adapt required utility middleware technologies including ROS and tools involving CR to the *GD-HDFS* environment.

The *COE*: This component is responsible to manage scalability of end-user's custom environments (container orchestration) across the geo-distributed *DMC* environments.

The *MAA*: This is responsible to manage automation ability across the platform. As a summary, it will act as interface agent and take intelligent decisions. To ease the operational and characteristics of the overall process, we have divided *MAA* module in to three sub-components. The front-end operation of the *MAA* manages by the *MAA-FE agent*, the middle-end operation manages by the *MAA-ME agent* and the back-end operation manages by the *MAA-BE agent*. The *MAA-FE* responsible to deal with all requests are coming from the *physical layer*. Moreover, it activates adequate waypoint of the *MAA-FE agent* and drives that request to adequate waypoint of the middle-agent. The *MAA-ME* is responsible to automatically manages that given task across the components with respect to their request's inputs and outputs. Then *MAA-BE* is responsible to automate required analytical and data science requirements (Big Data analytics, deep learning, or machine learning) if it requested such requirements by the *MAA-ME*.

The *DTMS*: This component is responsible for digital twin in the MNCRP. It allows users to prepare digital models of physical materials and robots, which simulate and analyze them.

The *ECB*: This component guarantees the secured cross communication within components (intra) and systems (inter). It employs extended Crosschain of the Blockchain technology.

The *ISOW*: This component is responsible to provide guaranteed privacy aware information management in the heterogeneous CR platform. The ontology knowledgebase and web services are two main provisions proposed to use.

The *ASC*: This component is responsible to automate all analytical requirements included data science of the CR of the MNCRP. This is an extended work of the automatic service composition [49].

3. Survey: Architecture for CR

This section gives summary of the survey of CR architecture. Table 1 shows the matrix we used to conduct the survey. Fig. 2 shows graph representing summarized survey.

Fig. 2 shows the literature works distribution in three dimensions with respect to the ADP, PIE, and PSH. MNCRP is the only works, that contributed most to both PIE and PSH. And with respect to the ADP, MNCRP is only behind the L. Gherardi and D. Brugli [37] contribution. They provide adequate ADP for both RA and SA while we provide ADP modeling for the CR domain as well as do not possessing adequate PIE and PSH. To the best of our knowledge, we are the first to propose modeling solutions for RA and abstract SA views of the MNCRP.

Table 1: Sub-Dimensions of ADP, PIE& PSH and Marks

SCORES DIMENSION	0	0.25	0.5	0.75	1
ADP	No architecture	Ad-hock RA or SA	Either SA or RA with modeling	Both SA & RA with modeling	UAF grid
PIE	No provisions for Industrial evolution	Limited provisions for Industry 4.0	Adequate provisions For Industry 4.0	Adequate provisions for Industry 4.5	Discussion for Industry 5.0
PSH	No mention about Heterogeneity	Default cloud security provision + Heterogeneity	Cloud security provision + Heterogeneity	Cloud security provision for Industry 4.5 + Heterogeneity	Cloud security provision for Industry 5.0 + Heterogeneity

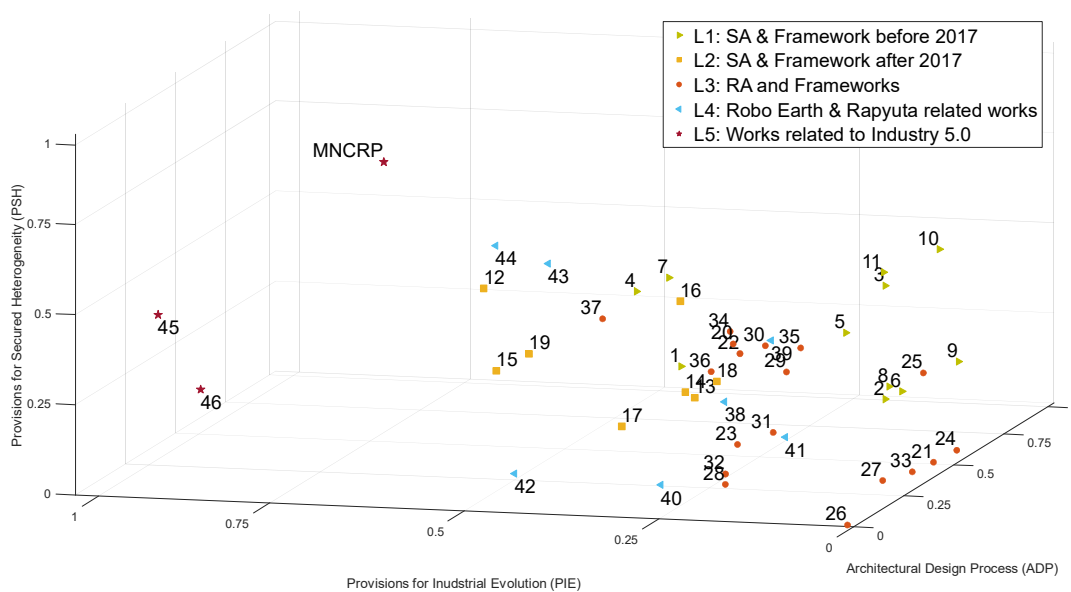


Fig. 2. X Vs Y vs Z: ADP vs PIE vs PSH

4. Architecture for CRWS

This section elaborates brief overview about the proposed solution. Subsection 2.1 gives brief overview of the nature of the robotics data communication. Subsection 2.2 briefs the proposed framework for the CR workflow scheduling.

4.1) Nature of CR Data Communication

Fig. 3 shows the graph, which represents the data packets vs communication protocol. We used the data provided by the Yoshino et. al [50]. According to the Fig.3 we learned that the CR data shows identical data communications patterns, which are stochastic processes and those depends on the communication protocol and modes of the data. According to the further investigation, we learned CR data patterns involving stochastic processes are heavily correlate with tasks involving the workflow and bandwidth of the communication facilitated as well. This is the very first unique and fundamental observation.

4.2) Proposed CR Workflow Scheduling Framework

Moreover, real-world cloud robotic user case involves two layered processes, which are communicating with geo-distributed cloud environment. Edge-cloud becoming preferred cloud platform for the mission-critical CRWS requirements. Nevertheless, CRWS has various non-functional property (NFP) requirements, such as some process needs higher processor, GPU and RAM performances while some of them need more disk-space with specified software requirements such as Hadoop. Therefore, it will be definite good practice to segment (for partitioning the workflow) the workflow based on NFPs (constraints) of the CRWS. Therefore, in the CRWS, it's better to consider, communication protocol, and task awareness, QoS-aware stochastic scheduling, NFP-aware Rule-based workflow partitioning, and two-layered edge cloud geo-distributed environment. Fig. 4 depicts proposed geo-distributed two layered architecture for CRWS.

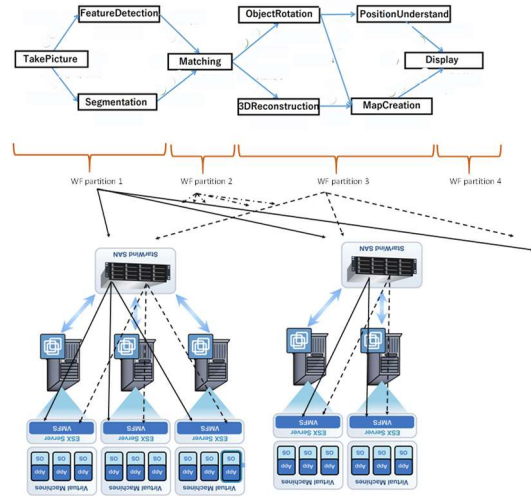


Fig. 4 Abstract architecture for CRWS

5. Conclusion

We proposed comprehensive modelling for RA for MNCRP which is based on SoS of UAF. When it compared to the existing works, it shows that the proposed method is reasonably addressed to our problem domain and achieved our research objectives. As of future works, we are working for the completion of the UAF grid, which comprises end to end ADP to the implementation plan, scheduling work for the MNCRP and finally commission MNCRP for the Fukushima-RTF. CRWS perspective, we are working to propose stochasticity aware CRWS technique and conclude the research.

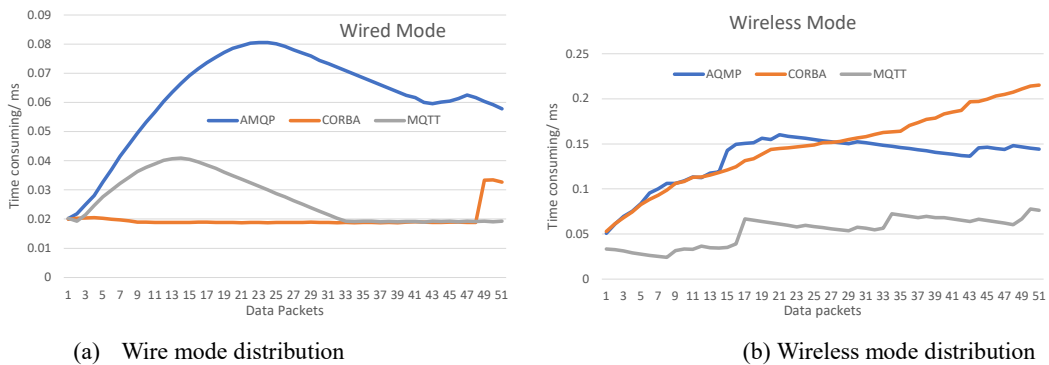


Fig. 3 Data communication protocols vs Data Packets

References

- [1] R. Arumugam et al., "DAVINCI: A cloud computing framework for service robots," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, no. June 2010, pp. 3084–3089, 2010, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509469.
- [2] Y. Chen, Z. Du, and M. García-Acosta, "Robot as a service in cloud computing," *Proc. - 5th IEEE Int. Symp. Serv. Syst. Eng. SOSE 2010*, pp. 151–158, 2010, doi: 10.1109/SOSE.2010.44.
- [3] C. Mouradian, S. Yangui, and R. H. Glitho, "Robots as-a-service in cloud computing: Search and rescue in large-scale disasters case study," *CCNC 2018 - 2018 15th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/CCNC.2018.8319200.
- [4] A. Koubaa, M. Alajlan, and B. Qureshi, "Roslink: Bridging ros with the internet-of-things for cloud robotics," in *Robot Operating System (ROS)*, Springer, 2017, pp. 265–283.
- [5] G. Hu, W. P. Tay, and Y. Wen, "Cloud robotics: architecture, challenges and applications," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 3, pp. 21–28, 2012.
- [6] M. Narita, S. Okabe, Y. Kato, Y. Murakwa, K. Okabayashi, and S. Kanda, "Reliable cloud-based robot services," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 8317–8322, 2013, doi: 10.1109/IECON.2013.6700526.
- [7] R. Hartanto and M. Eich, "Reliable, cloud-based communication for multi-robot systems," *IEEE Conf. Technol. Pract. Robot Appl. TePRA*, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1109/TePRA.2014.6869142.
- [8] X. V. Wang, A. Mohammed, and L. Wang, "Cloud-Based Robotic System: Architecture Framework and Deployment Models," *Faim*, no. 46, pp. 338–345, 2010.
- [9] S. A. Miratabzadeh et al., "Cloud Robotics: A Software Architecture," *IEEE World Autom. Congr.*, pp. 1–6, 2016.
- [10] A. Koubaa et al., "MyBot: Cloud-Based Service Robot using Service-Oriented Architecture," *Robotica*, vol. 107, pp. 8–13, 2016.
- [11] C. Lesire, G. Infantes, T. Gateau, and M. Barbier, "A distributed architecture for supervision of autonomous multi-robot missions: Application to air-sea scenarios," *Auton. Robots*, vol. 40, no. 7, pp. 1343–1362, 2016, doi: 10.1007/s10514-016-9603-z.s
- [12] J. Lambrecht and E. Funk, "Edge-Enabled Autonomous Navigation and Computer Vision as a Service: A Study on Mobile Robot's Onboard Energy Consumption and Computing Requirements," in *Iberian Robotics conference*, 2019, pp. 291–302.
- [13] A. Gallego, J. C. Pulido, J. C. González, and F. Fernández, "Design of a Robotic as a Service Platform to Perform Rehabilitation Therapies," in *Iberian Robotics conference*, 2019, pp. 681–692.
- [14] P. Bhavsar, S. H. Patel, and T. M. Sobh, "Hybrid robot-as-a-service (RaaS) platform (Using MQTT and CoAP)," *Proc. - 2019 IEEE Int. Congr. Cybermatics 12th IEEE Int. Conf. Internet Things, 15th IEEE Int. Conf. Green Comput. Commun. 12th IEEE Int. Conf. Cyber. Phys. So.*, pp. 974–979, 2019, doi: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCCom/SmartData.2019.00171.
- [15] Y. Watanobe, Y. Yaguchi, T. Miyaji, R. Yamada, and K. Naruse, "Data Acquisition Framework for Cloud Robotics," *2019 IEEE 10th Int. Conf. Aware. Sci. Technol. iCAST 2019 - Proc.*, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1109/ICAwST.2019.8923436.
- [16] N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and I. Jawhar, "Fog-Enabled Multi-Robot Systems," *2018 IEEE 2nd Int. Conf. Fog Edge Comput. IC FEC 2018 - conjunction with 18th IEEE/ACM Int. Symp. Clust. Cloud Grid Comput. IEEE/ACM CCGrid 2018*, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1109/CFEC.2018.8358727.
- [17] D. Ningombam, T. S. Chingtham, and M. K. Ghose, "A Knowledge Interchange Format (KIF) for Robots in Cloud," *Proc. 4th Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2019*, no. Icces, pp. 2046–2051, 2019, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002191.
- [18] K. Manikanda Kumaran and M. Chinnadurai, "Cloud-based robotic system for crowd control in smart cities using hybrid intelligent generic algorithm," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, 2020, doi: 10.1007/s12652-020-01758-w.
- [19] L. Lei, Y. Tan, K. Zheng, S. Liu, K. Zhang, and X. Shen, "Deep Reinforcement Learning for Autonomous Internet of Things: Model, Applications and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1722–1760, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2988367.
- [20] B. Hayes-Roth, K. Pflieger, P. Lalanda, P. Morignot, and M. Balabanovic, "A Domain-Specific Software Architecture for Adaptive Intelligent Systems," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 288–301, 1995, doi: 10.1109/32.385968.
- [21] B. Álvarez, A. Iborra, A. Alonso, and J. A. De la Puente, "Reference architecture for robot teleoperation: Development details and practical use," *Control Eng. Pract.*, vol. 9, no. 4, pp. 395–402, 2001, doi: 10.1016/S0967-0661(00)00121-0.
- [22] L. B. R. Oliveira, F. S. Osório, F. Oquendo, and E. Y. Nakagawa, "Towards a taxonomy of services for developing service-oriented robotic systems," *Proc. Int. Conf. Softw. Eng. Knowl. Eng. SEKE*, vol. 2014-Janua, no. January, pp. 344–349, 2014.
- [23] V. Srinivasan, R. R. Murphy, and C. L. Bethel, "A Reference Architecture for Social Head Gaze Generation in Social Robotics," *Int. J. Soc. Robot.*, vol. 7, no. 5, pp. 601–616, 2015, doi: 10.1007/s12369-015-0315-x.
- [24] K. Adam, A. Butting, O. Kautz, B. Rumpe, and A. Wortmann, "Executing robot task models in dynamic environments," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 2019, no. Cd, pp. 95–101, 2017.
- [25] K. Adam, A. Butting, R. Heim, O. Kautz, B. Rumpe, and A. Wortmann, "Model-driven separation of concerns for service robotics," *DSM 2016 - Proc. Int. Work. Domain-Specific Model. co-located with SPLASH 2016*, pp. 22–27, 2016, doi: 10.1145/3023147.3023151.
- [26] N. Hochgeschwender, G. Biggs, and H. Voos, "A reference architecture for deploying component-based robot software and comparison with existing tools," *Proc. - 2nd IEEE Int. Conf. Robot. Comput. IRC 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 121–128, 2018, doi: 10.1109/IRC.2018.00026.
- [27] A. J. Rohling, V. V. G. Neto, M. G. V. Ferreira, W. A. Dos Santos, and E. Y. Nakagawa, "A reference architecture for satellite control systems," *Innov. Syst. Softw. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 139–153, 2019, doi: 10.1007/s11334-019-00322-w.
- [28] S. Bosse and D. Lehms, "Material-integrated cluster computing in self-adaptive robotic materials using mobile multi-agent systems," *Cluster Comput.*, vol. 22, no. 3, pp. 1017–1037, 2019, doi: 10.1007/s10586-018-02894-x.
- [29] O. Kosak, C. Wanninger, A. Hoffmann, H. Ponsar, and W. Reif, "Multipotent systems: Combining planning, self-organization, and reconfiguration in modular robot ensembles," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 1, pp. 1–43, 2019, doi: 10.3390/s19010017.
- [30] T. Borangiu, P. Gilbert, N. A. Ivanescu, and A. Rosu, "An implementing framework for holonic manufacturing control with multiple robot-vision stations," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 22, no. 4–5, pp. 505–521, 2009, doi: 10.1016/j.engappai.2009.03.001.
- [31] M. Short and K. Burn, "A generic controller architecture for intelligent robotic systems," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 292–305, 2011, doi: 10.1016/j.rcim.2010.07.013.
- [32] B. G. Drake, S. J. Hoffman, and D. W. Beaty, "Human exploration of mars, design reference architecture 5.0," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, pp. 1–24, 2010, doi: 10.1109/AERO.2010.5446736.

- [33] G. B. Sanders, W. C. Carey, J.-C. Piedboeuf, and A. Lorenzoni, "Lunar In-Situ Resource Utilization in the ISECG Human Lunar Exploration Reference Architecture," *IAC-10 A*, vol. 5, 2010.
- [34] A. I. Wang and B. Wu, "Using game development to teach software architecture," *Int. J. Comput. Games Technol.*, vol. 2011, 2011, doi: 10.1155/2011/920873.
- [35] M. Hülse, S. McBride, and M. Lee, "Multi-modal visual attention for robotics active vision systems - A reference architecture," *AISB 2011 Conv. - Proc. AISB 2011 Symp. Archit. Act. Vis.*, no. April 2011, pp. 21–28, 2011.
- [36] J. Jiang, F. Zhao, and N. Qiu, "Research on SOA-based architecture of Collaborative Product Commerce," *Proc. - 2012 IEEE Symp. Robot. Appl. ISRA 2012*, pp. 65–67, 2012, doi: 10.1109/ISRA.2012.6219120.
- [37] L. Gherardi and D. Brugali, "Modeling and reusing robotic software architectures: The HyperFlex toolchain," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 6414–6420, 2014, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907806.
- [38] R. Waibel, M. and Beetz, M. and Civera, J. and D'Andrea, R. and Elfving, J. and Galvez-Lopez, D. and Haussermann, K. and Janssen, R. and Montiel, J.M.M. and Perzylo, A. and Schiessle, B. and Tenorth, M. and Zweigle, O. and van de Molengraft, "RoboEarth-A World Wide Web for Robots," *Robot. Autom. Mag. IEEE*, vol. 18, no. June, pp. 69–82, 2011, doi: 10.1109/MRA.2011.941632.
- [39] A. Perzylo, B. Schießle, K. Häussermann, O. Zweigle, P. Levi, and A. Knoll, "Server-sided automatic map transformation in RoboEarth," *Inform. aktuell*, pp. 203–216, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-32217-4-22.
- [40] M. Tenorth, K. Kamei, S. Satake, T. Miyashita, and N. Hagita, "Building knowledge-enabled cloud robotics applications using the ubiquitous network robot platform," in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 5716–5721.
- [41] M. Tenorth, A. C. Perzylo, R. Lafrenz, and M. Beetz, "Representation and exchange of knowledge about actions, objects, and environments in the roboearth framework," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 643–651, 2013.
- [42] L. Riazuelo et al., "RoboEarth Semantic Mapping: A Cloud Enabled Knowledge-Based Approach," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 432–443, 2015, doi: 10.1109/TASE.2014.2377791.
- [43] G. Mohanarajah, D. Hunziker, R. D'Andrea, and M. Waibel, "Rapyuta: A Cloud Robotics Platform," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 481–493, 2015, doi: 10.1109/TASE.2014.2329556.
- [44] R. Janssen, R. van de Molengraft, H. Bruyninckx, and M. Steinbuch, "Cloud based centralized task control for human domain multi-robot operations," *Intell. Serv. Robot.*, vol. 9, no. 1, pp. 63–77, 2016, doi: 10.1007/s11370-015-0185-y.
- [45] S. Nahavandi, "Industry 5.0-a human-centric solution," *Sustain.*, vol. 11, no. 16, 2019, doi: 10.3390/su11164371.
- [46] K. S. Welfare, M. R. Hallowell, J. A. Shah, and L. D. Riek, "Consider the Human Work Experience When Integrating Robotics in the Workplace," *ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact.*, vol. 2019-March, pp. 75–84, 2019, doi: 10.1109/HRI.2019.8673139.
- [47] B. C. Dean, "Approximation algorithms for stochastic scheduling problems," *Massachusetts Institute of Technology*, 2005.
- [48] T. H. A. S. Siriweera and K. Naruse, "Survey on Cloud Robotics Architecture and Model-driven Reference Architecture for Decentralized Multi-cloud Heterogeneous Robotics Platform," *IEEE Access*, *under review*.
- [49] T. Hannadige and A. Sanjaya, "Architecture for Intelligent Big Data Analysis based on Automatic Service Composition," 2019.
- [50] 吉野大志, 渡部有隆, 矢口勇一, 中村啓太, and 成瀬継太郎, "異種システム統合 Gateway RT コンポーネントの Kubernetes によるプラットフォーム化," in *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020*, 2020, pp. 2P1-G02.

4.9. ロボットセキュリティの考え方と課題

会津大学 中村 章人

概要：従来は個別に考えていたシステムのセキュリティとセーフティを統合的に捉え、対応する必要性が高まってきた。本稿では、セーフティとセキュリティの相互の関係や影響に着目し、ロボットシステムのセキュリティについて課題や論点を明確にする。また、二つの問題を統合する上での指針を示す。

キーワード：セキュリティ、セーフティ、リスク、脅威、ハザード、事故

1. はじめに

情報技術およびインターネットが普及した現代社会において、サイバー攻撃は、あらゆる組織や個人が直面する脅威である。情報システムの相互接続性は、Web によるサーバの公開、クラウドによる外部リソースの利用という変遷を経て、IoT 技術の発展によりあらゆるモノにもたらされた。これらの変化に伴い、サイバー攻撃も組織の外部から内部への侵入だけでなく、内部から外部への通信、外部にあるリソース、あらゆるモノが標的になっている。

ネットワークに接続するロボットも IoT の一種と考えられる。ここでロボットとは、センサーとアクチュエータ（可動部）を持つシステムである。さらに、移動または飛行するものもある。ロボットに求められる要件の一つは安全に稼働すること、すなわちセーフティである。しかしながら、ロボットの種類や用途は多様で、セーフティはそれぞれ個別に規定される。特に高いセーフティが要求されるシステム、いわゆるセーフティ・クリティカル・システムでは、フェイル・セーフやフェイル・オペレーショナルなどの機構が組み込まれている[1]。

本稿では、セーフティとセキュリティの相互の関係や影響に着目し、ロボットシステムのセキュリティについて課題や論点を明確にする。セーフティについては、抽象的で一般的なロボットのリスク、すなわちシステムの損傷、人身事故、周辺物の破壊などを想定する。また、システムのライフサイクルと関連づけて技術課題を整理する。セーフティとセキュリティの要求は競合することを指摘し、対応の指針を示す。

本稿の構成は次のとおりである。2 章では、セキュリティとセーフティの概念および両者の関係について説明する。3 章では、両者の関係を踏まえたリスク分析の課題を示す。4 章では、セキュリティとセーフティを統合して扱う上での技術課題を示す。5 章では、セキュリティとセーフティを統合して対応する上での方針を述べる。6 章で総括する。

2. セキュリティとセーフティ

まず、セキュリティとセーフティの関係と相互作用について述べる。

〈2・1〉セキュリティとセーフティの意味

セキュリティとセーフティとは何か。広い意味では、どちらもリスクを想定して対応することである。システムは人が考えて作るもので、想定も対応も不完全な可能性がある。セーフティは事故や損失がないこと、セキュリティは情報資産の機密性、完全性、可用性を保障することというのが一般的な定義である。

セキュリティとセーフティの意味は、対象とするシステムとそれを取り巻く環境との相互作用で考えるとわかりやすい(図)。環境には、他のシステムや人間、建物や移動体などの構造物といった様々なものが含まれる。セキュリティは環境がシステムに無害であるという性質であるのに対して、セーフティはシステムが環境に無害であるという性質である。逆の見方をすると、セキュリティは環境からシステムを保護するのに対し、セーフティはシステムから環境を保護する。

例えば、ロボットの制御を第三者に乗っ取られないようにする、センサーで取得したデータが正しくサーバに格納されかつ漏えいしないようにすることがセキュリティに求められる。一方、ロボットが意図しない動作をして周囲の人間に衝突してしまうことを防ぐ、自動運転車が交通標識を誤認して一時停止をせずに他の自動車に衝突することを防ぐのがセーフティの役目である。

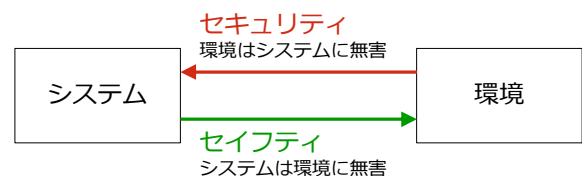


図 1. セキュリティとセーフティ

〈2・2〉セキュリティとセーフティの相互作用

セキュリティとセーフティはどのような関係にあり、どのように影響しあうのか。セキュリティがセーフティに影響を与える場合と、逆にセーフティがセキュリティに影響を与える場合とが考えられる。

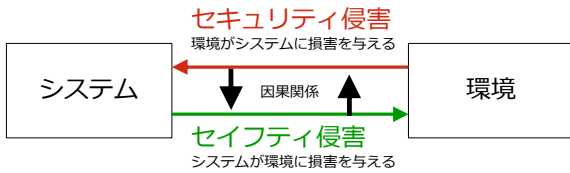


図 2. セキュリティとセーフティの相互作用

(1) セキュリティがセーフティに影響を与える

セキュリティの侵害によってハザードまたは事故が起きる。例えば、ロボットの制御系へのアクセス制御に脆弱性があり、移動コマンドが不正に発行され、周囲の人や物に衝突する。さらに、衝突でロボットの記憶装置が故障してしまい、原因究明のためのログデータを読み出せなくなる。これはセキュリティの完全性・可用性の損失である。

(2) セーフティがセキュリティに影響を与える

セーフティ制約によりセキュリティが侵害される。言い換えると、計画された事故防止策がセキュリティに悪影響を与えてしまう。例えば、衝突回避のためロボットを緊急停止させたことにより、ロボットがコマンドを受け付けられない状態になって可用性が失われ、ログデータの書き込み処理が中断されてログファイルの完全性が失われる。

〈2・3〉セキュリティ・インフォームド・セーフティ

Bloomfield らは、システムの相互接続が進む中で、セキュリティがセーフティに与える影響を考慮することの必要性を「セキュリティ・インフォームド・セーフティ (security-informed safety)」と表現している[2][3]。インフォームドとは、「情報に基づく」または「よく理解した上での〈決断・意見〉」という意味である。セーフティにはセキュリティの考慮が必要不可欠であり、「セーフティ・クリティカル・システムにおいて、システムがセキュアでなければすなわちそれはセーフではない」と言っている。

3. リスクの分析

セキュリティとセーフティは、広い意味で、どちらもリスクを想定して対応することであると述べた。システムの設計前に、まずリスクの分析が必要である。既に述べたセキュリティとセーフティの関係に基づいて、両者を統合する上でのリスク分析の課題を述べる。

〈3・1〉セキュリティ侵害の結果がどのようなハザードや事故につながるかを知る

セキュリティの侵害がセーフティにどのような悪影響を与えるかを分析する必要がある(図 (A))。セーフティ設計におけるリスク分析で、ハザードまたは事故の原因がセキュリティに関係する場合である。ロボットを対象としたもの、制御システムを対象としたものなどいくつかのガイドがあるのでそれらを参考にされたい[4][5]。文献[4]では、ロボットに対するセキュリティ侵害の目的が分析されている。

セキュリティ侵害による直接の影響に加えて、副作用の問題を指摘したい。例として、悪意あるファームウェア書換えを考える。攻撃者の目的は、ロボットの制御を誤らせ衝突事故を引き起こすことである。ファームウェアに実装された物体認識やブレーキ制御が設計どおりに作動せず、人や物に衝突してしまう。しかし、この書換えによってソフトウェアの自動アップデート機能が働かなくなると、バグフィックスやセキュリティパッチが適用されなくなってしまう。このように、攻撃者の目的やセーフティへの影響を分析するだけでなく、さらなる脆弱性を作ってしまう副作用も考えなくてはならない。

〈3・2〉セーフティのリスク分析結果から、どのようなセキュリティ防御策が必要かを考える

セーフティ設計が必要なシステムでは、まず先にセーフティの分析を行い、その結果判明したリスクの原因となるセキュリティ脅威と防御策を考えるという手順を推奨したい(図 (B))。セキュリティの分析を先に行くと、セーフティに影響しない一般的なセキュリティの検討が発散してしまい、対策の優先度を定める根拠がはっきりしない。逆に、セーフティを優先することで、システムの要件とその優先度が明確になる。ハザードや事故の深刻さに基づいて、その原因となるセキュリティ脅威を分析する。

例えば、前述のファームウェア書換えによる衝突事故の誘発を考える。まず、セーフティの分析を行い、衝突を重大事故と定義し、周辺物との最小限の距離がないというハザードが抽出される。これを回避するために、ロボットに物体認識や距離計測、ブレーキ制御などが設計される。この後に、回避策を無効にするようなセキュリティ侵害の経路や攻撃方法、保護すべき情報資産を分析し、防御策を導入する。例えば、ファームウェアの保護については、TPM とセキュアブート、OTA (Over The Air) のプロトコルとサーバ認証、ソフトウェア署名などが考えられる。

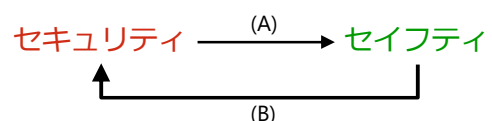


図 3. リスク分析の順序

4. セキュリティ・セーフティ統合の技術課題

セキュリティとセーフティを統合して扱う上での技術課題を示す。

〈4・1〉 論点

まず、セキュリティとセーフティの統合についての論点を明確にする。

(1) 事故につながる事象(セキュリティの脅威またはセーフティのハザード)を予測できないならば、事故は予防できないか?¹

ソフトウェアの脆弱性と攻撃の類型はある程度分かっており、開発段階でかなり低減や除去ができる。

以下の対応が考えられる。

- セキュアプログラミングの実践
- さまざまな静的コード解析、ペネトレーションテスト、ファジングなどのツールの利用

また、セキュア・バイ・デザイン (secure by design) の考え方を取り入れることができる。

- 設計・開発プロセスの早い段階でセキュリティを考慮するほど、よい結果が得られる。²
- システムにあらかじめセキュリティ対策を組み込むことは、完成したシステムに防御策を加えるよりも効果的である。

(2) セーフティとセキュリティに矛盾あるいはトレードオフがある場合にどう対応するか?

セキュリティでは、資産の価値、損害の程度、脅威の深刻さの三つと、投入できる資源を考慮して防御の優先付けと対策方法の選択を考える。しかし、セーフティ・クリティカル・システムは、セキュリティ上の損失よりも事故防止が優先されるであろう。そのような設計では、セキュリティとセーフティの要求に競合が生じる。例えば、セーフティの原理としてのフェイルストップは、DoS (Denial of Service) 攻撃を容易にする。競合の解決には、経済的、時間制約(納期)的な理由による判断もあり得る。また、利用環境を考慮すると結論が変わることがある。

(3) サプライチェーンにおけるサードパーティ・コンポーネントのセキュリティをどう評価するか?

2018年にいわゆるスパイチップが話題となった[7]。また、

¹ 文献[6]では、セーフティの文脈で「事故につながる事象が予測できないからといって、事故が予防できないということにはならない。」と言っている。

ソフトウェアのライブラリ改ざんや更新サーバの侵害がいくつも報告されている[8]。サプライチェーンのある段階で攻撃が実行されハードウェアやソフトウェアが不正に改変された場合、これらを利用して構築したシステムは脆弱である。また、ソフトウェア自動更新の仕組みに介入される可能性もある。各コンポーネントの開発・製造の段階や出荷・公開の前に攻撃を検知できることが求められる。また、利用者側でセキュリティの評価をしようとしても、対象がブラックボックスで十分な結果が得られない可能性がある。

(4) 各コンポーネントがセキュアであれば、システム全体はセキュアであるか?

複雑なシステムは、複数の提供者が関わる複数のコンポーネントで構成される。オープンソースのソフトウェアを利用することもある。これらを組み合わせでできたシステムのセキュリティを診断する必要がある。さらに、複数のシステムを組み合わせでシステムを構成することもある。たとえば、複数台や複数種類のロボットをサーバやクラウドサービスを介して連携させるようなシステムが想定される。このとき、各コンポーネントや単一システムのセキュリティを評価できたとしても、システム全体のセキュリティを評価することは難しいであろう。これは System of Systems Engineering (SoSE) の研究で扱う問題といえる。

〈4・2〉 技術課題

セキュリティとセーフティの統合は、自動運転技術などの分野で議論が進んでいると思われるが、明快で適用可能な方法論が十分に成熟しているとは言えない。ここでは、ロボットシステムを対象に技術課題を挙げる。システムのライフサイクルにマッピングしたものを図に示す。

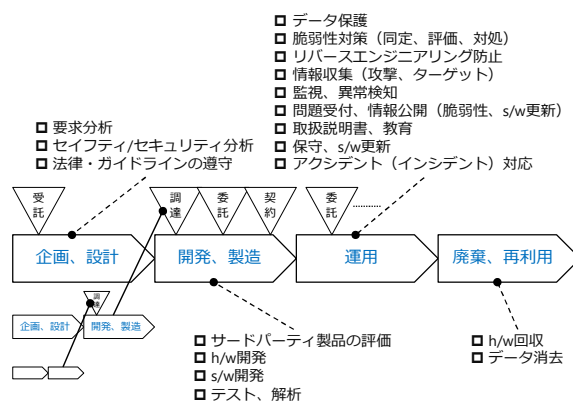


図 4. システムのライフサイクルと技術課題

² 文献[6]では、セーフティの文脈で「安全が、開発プロセスの早い段階で考慮されるほど、より良い結果が得られる。」「システムに安全を組み込むことは、完成した設計に防護装置を加えるよりも、はるかに効果的である。」と言っている。本稿は、セキュリティの文脈でこれらを言い換えた。

- ロボットシステムの要求・設計の段階で、セーフティとセキュリティをどうやって統合的に分析するか。
- セキュリティに欠陥のないソフトウェアやシステムをどうやって設計・開発または調達するか。
- コンポーネントやシステムの脆弱性をどうやって診断するか。
- ロボットシステムに使用するソフトウェアをどうやって継続的に更新するか。停止できないシステムのソフトウェアをどのように更新するか。
- ロボット内に記憶されるデータおよびロボット間やサーバとの通信の機密性・完全性をどのように保障するか。
- ロボットやサーバ、オペレータやシステム管理者などのシステムエンティティおよびユーザをどのように認証し、認可を与えるか。
- ロボットシステムをどのように監視するか。
- 攻撃やハザード・事故をどのように検知するか。検知後、人にどのように伝達するか。
- ハードウェアとソフトウェアのリバースエンジニアリングをどうやって防止するか。
- ハードウェアの損壊や盗難をどのように防ぐか。
- ロボットシステムに関わる人のプライバシーにどう配慮するか。

5. セキュリティ・セーフティ統合対応の方針

ロボットシステムのセーフティとセキュリティを統合して対応するには、セーフティ要件をまず定義し、それに影響を与えるセキュリティを重点的に考えるべきである。すなわち、セーフティハザードとしてのセキュリティ（脆弱性、攻撃可能性）、あるいはセーフティから「逆算」したセキュリティこそが重要である。

また、両者の分析と統合においては、以下の点に注意が必要である。

- セーフティ制約を保障するためには、セキュリティが犠牲になるのはやむをえないと考える。シナリオを分析してあらかじめ把握し、リスクを保有する。例えば、衝突回避のためにドローンを落下させると、壊れてデータの読み出しができなくなってもしかたない。
- 長期の運用では、時間と共に状況が変化することを考慮する。運用開始後に顕在化する脆弱性があり、攻撃方法は進化する。
- ハードウェアやサービスによっては、ソフトウェアやシステムの変更が難しい場合がある。また、変更できるとしても実施タイミングに制約がある場合がある。
- システムの使い方はユーザに依存する。ユーザは意図しない利用の仕方をする可能性がある。

- セーフティとセキュリティの競合（矛盾）解決は、経済的・経営的な判断も必要である。例えば、サポート期間や保証期間を設定する。
- 《技術、運用、制度》のセットで問題を解決していく（図）。

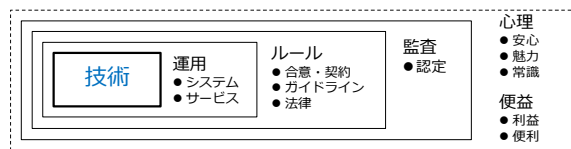


図 5. 技術とそれ以外の対応方法

6. おわりに

本稿では、ロボットシステムのセキュリティとセーフティを統合的に扱う上での課題や論点を示した。セキュリティとセーフティは相互に影響を与え、それぞれの対応には矛盾が生じることもある。セーフティが重要なシステムでは、セーフティ要件をまず定義し、それに影響を与えるセキュリティ脅威への対応を重点的に考えるべきだ。セーフティ要件を達成するためには、セキュリティを犠牲にせざるを得ないと考える。

文 献

- [1] Wikipedia, "Safety-critical system".
https://en.wikipedia.org/wiki/Safety-critical_system
- [2] K. Netkachova, R. E. Bloomfield, "Security-Informed Safety", *IEEE Computer*, Volume 49, Issue 6, pp.98-102, June 2016.
- [3] R. Bloomfield, et al., "Security-Informed Safety: Supporting Stakeholders with Codes of Practice", *IEEE Computer*, Volume 51, Issue 8, pp.60-65, Aug 2018.
- [4] 会津大学, TIS, ネットワンシステムズ, "サービスロボット・セキュリティガイドライン 第1版", 2019年5月.
<https://rtc-fukushima.jp/technical/3170/>
- [5] 情報処理推進機構, "制御システム セーフティ・セキュリティ要件検討ガイド", 2018年3月.
<https://www.ipa.go.jp/sec/reports/20180319.html>
- [6] N. G. Leveson, "セーフウェア", 松原/監訳・訳, 片平他/訳, 翔泳社, ISBN:978-4798116846, 2009年.
- [7] 長谷川, 戸川, "スパイチップはあるのか ハードウェアセキュリティの必要性", 情報処理, Vol.60, No.1, pp.4-6, 2019年.
- [8] M. Mokbel, "C/C++ Runtime Library Code Tampering in Supply Chain", Trend Micro Security Blog, April 22, 2019.
https://www.trendmicro.com/en_us/research/19/d/analyzing-c-c-runtime-library-code-tampering-in-software-supply-chain-attacks.html

5.1. 日本のロボット技術と会津大学のロボット研究

国立研究開発法人産業技術総合研究所 安藤 慶昭

Abstract: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology has collaborated and supported robot software-related issues in the subsidized project "Industry-Academia Collaboration Robot Research and Development Support Project" by Fukushima Prefecture based on our technical consulting scheme. This project is a distinctive project focusing on robot software that takes advantage of the characteristics of the University of Aizu. This paper gives an overview of the current position of the project in robot technology research and development in domestic and the world.

1. 緒言

福島県による補助事業「産学連携ロボット研究開発支援事業」(以下本事業と称する)において、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)は、弊所技術コンサルティング制度に基づき、ロボットのソフトウェアに関する二つの技術(ロボット開発基盤: RT ミドルウェアとロボット用シミュレータ: Choreonoid)、ロボット技術の普及・人材育成活動およびロボット関連団体との連携やオープンソースソフトウェア(OSS)に関して協力させていただいた。

RT ミドルウェア(以下 RTM)は、ロボット機能要素のソフトウェアモジュール(RT コンポーネント: RTC)を多数組み合わせ合わせて、ロボットシステムを構築するためのソフトウェアプラットフォームであり、産総研では 2005 年からオープンソース実装: OpenRTM-aist⁽¹⁾を一般に公開するとともに、国際標準化団体 OMG (Object Management Group) において標準化⁽²⁾、普及活動等を推進してきた。Choreonoid⁽³⁾は産総研が開発するオープンソースのロボット用統合 GUI ソフトウェアであり、動力学シミュレーション機能や動作振り付け機能を備え、産総研が開発するヒューマノイドロボットのハードウェア・ソフトウェア設計や制御・動作生成などに利用されてきた。

本事業では、2015~2017 年度実施された福島県「産学ロボット技術開発支援事業」(前事業)に引き続き、産総研が開発・配布しているこれらのソフトウェア技術を活用していただきつつ、ロボット研究開発が進められてきた。本稿では本事業において 2018 年から 3 年間にわたり取り組まれてきたロボット研究開発活動について、国内外の動向を概観しつつ、その位置付けについて述べる。

2. ロボットミドルウェア

〈2-1〉近年の動向

ロボットミドルウェアには、産総研が開発する RT ミドルウェア: OpenRTM-aist や、米国 Open Robotics による ROS⁽⁴⁾等が存在するが、現在、世界的には ROS が主流となっている。現在、ROS コミュニティにおいては、主にアカデミック

向けの ROS (便宜的に ROS1 とする) から、より実用的な利用を目指した ROS2 へシフトしようとする動きがある。しかしながら、ROS1 で蓄積した資産が膨大であるがゆえ、依然として大半のユーザは ROS1 を使用している。しかしながら、ROS を開発する Open Robotics も ROS2 を推奨しているように、アーキテクチャ的には、組込み、リアルタイム、標準通信プロトコルに対応した ROS2 の方が優れており、産業応用を考慮すれば将来的には ROS2 へ移行せざるを得ない。

〈2-2〉OpenRTM

産総研では 2005 年から RT ミドルウェアのオープンソース実装: OpenRTM-aist⁽¹⁾を一般に公開するとともに、公開後も様々な機能追加とバージョンアップを重ね、本稿執筆時点での最新版は OpenRTM-aist-1.2.2 となっている。近年は、ROS の台頭や、IoT、CPS (Cyber Physical Systems) といった応用分野の広がりにより、RTM を様々なプロトコルへ対応させる必要が生じたため、汎用プロトコル変換フレームワークの導入を進めており、近々リリースされる OpenRTM-aist-2.0 に搭載予定である。

〈2-3〉本事業における取り組み

会津大学では 2015 年度から、福島県補助事業として、RT ミドルウェアを基盤としたソフトウェアライブラリ: RTC-Library-FUKUSHIMA を立ち上げ、同事業による開発成果としての RT コンポーネントの蓄積と公開を行ってきた。本事業では、RT ミドルウェアに加えて、ROS による様々なロボット・IoT システムの開発を行ってきた。ソフトウェア成果物の蓄積サイトとしての RTC-Library-FUKUSHIMA は、株式会社 FSK により RTC の蓄積のみならず、ROS による成果物への対応や、GitHub への対応を行いつつ、引き続き本事業においても利用されてきた。

具体的なロボットシステム開発の一例としては、アクアクルー株式会社による既存の水処理管理機器の RTM による拡張、および遠隔監視・遠隔管理などが挙げられる。このようなレガシーシステムを IoT 化することもミドルウェアを用いることの利点の一つである。

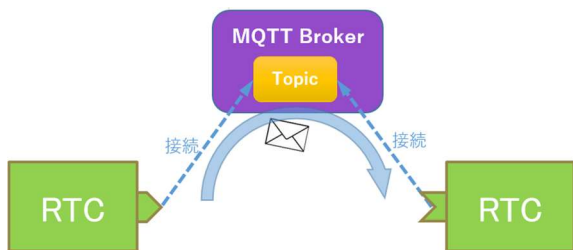


Fig.1 OpenRTM MQTT Transport extension by Univ. of Aizu⁽⁶⁾

また、会津大学では、RTM を用いたシステムの IoT 化を容易にするため、OpenRTM のポートを拡張し、MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) を介した通信を可能にする拡張モジュール：OpenRTM MQTT Transport⁽⁶⁾を開発し一般公開した。ミドルウェアが持つべき機能について会津大と産総研の研究者が議論し、OpenRTM の汎用プロトコル変換フレームワークや MQTT Transport 実現に至ったことは有意義であった。なお、(6) の OpenRTM 用拡張モジュールは、その重要性・機能性が評価されて 2020 年度の RTM コンテストにおいて、最優秀賞である計測自動制御学会 RT ミドルウェア賞を受賞している。

また、主に株式会社東日本計算センターが開発を行ってきた Robot Data Repository (RDR) は、ロボット内部データをクラウドに収集し、多段データベース (以下 DB) である RDR により変換・加工を行う、ロボット制御に利用するクラウドロボティクスの中核的機能であり、今後様々なシステムがデータ駆動型に移行する上で重要な技術が確立されたと言える。

本事業においては、産学連携の仕組みを活かし、こうしたロボット基盤技術の基礎を固めつつ、IoT や CPS といった分野へ展開可能な重要技術の取り組みがなされた。

3. ロボットセキュリティ

〈3・1〉ロボットセキュリティの動向

近年、様々な分野におけるサイバー攻撃が増加し、連日ニュースとして報じられるなど、サイバーセキュリティへの関心が高まっている。ロボット分野においては、生活支援ロボットやサービスロボットの市場が徐々にではあるが広がりつつある一方、セキュリティに関しては、体系的なガイドラインや指針は存在せず、その対応は個別のメーカー・サービス事業者任せられているのが現状である。個人情報を扱ったり、物理的に動きまわるロボットは、セキュリティの脅威にさらされた際に、IT・IoT 機器とはまた異なるリスクが顕在化する (Fig.2)。

経済産業省は、Society 5.0 のように様々なデータ流通が進む社会におけるセキュリティリスク増大に対処するため、2019 年に「サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク (CPSF: Cyber Physical Security Framework)⁽⁷⁾」を策定した。加えて CPSF の具体的な実装の推進を目指して、各産業分野におけるセキュリティを議論するためのタスクフォースを新たに設置した。しかし、ロボットに関連するセキ

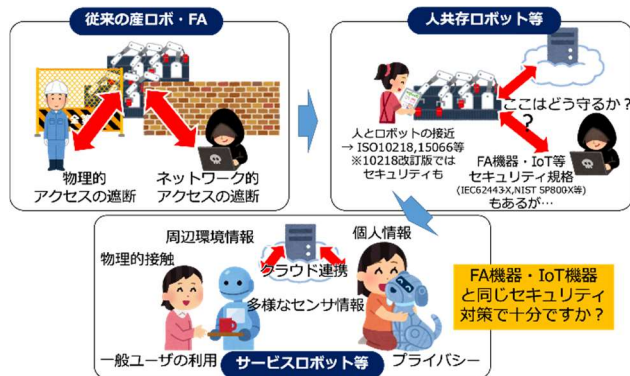


Fig.2 Security issue in service robot systems.

ュリティを議論するタスクフォースとしては産業機械を含む産業用ロボット等に限定されていた。

また、ロボットに関連するセキュリティの動きとしては、NEDO DRESS プロジェクト⁽⁸⁾におけるセキュリティに関する取り組みも始まるなど、セキュリティはロボット業界においても非常に重要なトピックとなっている。

〈3・2〉会津大学における取り組み

こうした状況下において、本事業では当初からロボットセキュリティに注目し、ネットワンシステムズ株式会社、TIS 株式会社を中心として、サービスロボット・セキュリティガイドラインを作成し 2019 年に公開している。関連情報、システム、利用環境が多岐にわたるサービスロボットシステム特有のコンテキストを、ミスユースケース図で明確にすることで、多角的に分析する手法などが提案された。これは、ロボット分野においては世界的に見ても先進的な取り組みであると言える。

〈3・3〉RRI セキュリティ調査検討委員会

サービスロボットシステム開発の課題解決を目指している RRI (ロボット・産業 IoT イニシアティブ協議会) 内で、著者が幹事団の一人を務めるロボットイノベーション WG においても、セキュリティへの関心の高まりからサービスロボット一般を対象としたセキュリティガイド策定のための調査検討委員会を 2020 年度に新規に設置した。

この委員会を立ち上げるにあたり、本事業でのロボットセキュリティに関する取り組みを参考にさせていただくとともに、同調査検討委員会の委員長及び副委員長には本事業に参加されているネットワンシステムズ株式会社の山崎治郎先生と会津大学の屋代真先生にご就任いただいた。

現在、ロボットセキュリティ調査検討委員会では、ロボットメーカー、インテグレータ、ユーザ、認証機関、大学、研究機関等、ロボット産業に関わる様々な参加者が集まり議論を行っている。サービスロボット特有の守るべき資産・情報について整理し、システム構造やサービス運用から想定される脅威、ロボット特有の安全機能との関係、これらを総合した結果としてのリスクについて明らかにし、サービスロボットシステムがとるべきセキュリティ対策の指針をガイドラインと

してまとめているところである。最終的には本ガイドラインは RRI の Web ページから一般に公開される見込みである。

4. サイバーフィジカルシステム(CPS)

〈4-1〉 CPS

サイバーフィジカルシステム (Cyber Physical Systems: CPS) とは、Fig.3 に示すように、サイバー空間と実空間であるフィジカル空間を、センサ技術により計測し、サイバー空間に蓄積・解析し、判断を実空間にフィードバックすることで、産業システム・社会システムを効率化するシステム⁽⁹⁾ である。CPS には備えるべき基本機能があるが、その中で上述したように、センサによる実世界の計測と蓄積、およびロボット技術などによる実空間へのフィードバックが重要な技術である⁽¹⁰⁾。

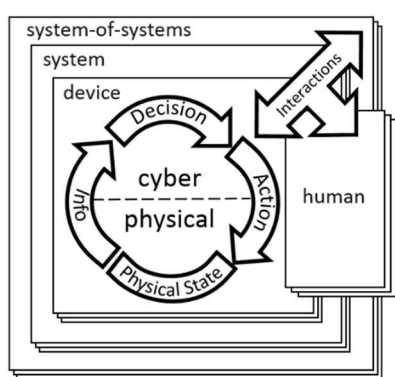


Fig.3 Basic Concept of Cyber Physical Systems⁽¹⁰⁾

〈4-2〉 海外の動向

CPS という言葉は 2014 年頃のドイツによるインダストリー 4.0 と同時期に、米国での Industrial Internet 等の概念とともに広く認知されるようになった。インダストリー 4.0 が工業生産システムに焦点をあてているのに対し、米国における元々の CPS の概念では、センサ・アクチュエータを備えた機器による物理世界の効率的制御が主たる目的であったが、最近ではビッグデータ、AI、IoT 技術の進展とも相まって、社会全体や分野横断的なシステム効率化の技術として認知されつつある。日本においては類似の概念が Society5.0 としても認知されている。産業技術総合研究所においても、これまでのロボット研究から、新たな研究領域としての CPS ヘシフトすべく、2020 年度より著者の所属もロボットイノベーション研究センターからインダストリアル CPS 研究センターへと改組された。このほか産総研では、サイバーフィジカルセキュリティ研究センターなど CPS が次世代の重要な研究領域として認識されている。

〈4-3〉 本事業の位置づけ

本事業においては早期からロボティクスをクラウドと連携させるクラウドロボティクスの概念が提唱されてきた。本事業で開発されたロボット技術と DB 技術を組み合わせた RDR (Robot Data Repository) の技術により、ロボットが生成する大量のデータをクラウド DB に蓄積・処理可能となった。

こうした術は CPS におけるデータ収集・処理の有力かつ中核的な技術となり得る。また、RTM 技術と MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) を組み合わせたロボット制御をインターネット/クラウドを介して行う技術は、CPS におけるクラウドからローカルなロボット制御や、COVID-19 により再び注目を集めるテレオペレーション技術にとって重要な技術であると言える。この他にも、クラウドロボティクス技術や、エンタープライズシステムとサービスロボットの連携、シミュレーション技術などは、CPS の基盤となる技術である。また、本事業では、研究開発の対象をサービスロボット、災害対応ロボットや、遠隔監視・プラント制御など、様々なドメインを対象としており、基盤技術のクロスドメイン展開についても実証している。今後、本事業で開発された技術群は、これらのドメインのみならず、CPS を必要とする様々な分野で応用されていくと考えられる。

5. 結言

本稿では、ロボティクスおよびその派生技術としての CPS といった研究領域に着目し、世界および国内での研究開発動向を概観しつつ、それらの中での本事業の位置付けを示した。そのいくつかは非常に先進的な取り組みであり、国内のロボット技術および研究をリードするものである。

本事業では、ロボットのみならず、今後他のドメインでも活用可能な CPS 基盤技術が数多く開発された。福島県にこれらを支える技術をもつ企業が、会津大学を中心に集結していることは、他地域ではあまり見られない特筆すべきことである。この他にも、福島ロボットテストフィールドや、楡葉遠隔技術開発センターなど、ロボット研究開発にとって重要な拠点が福島にはあり、今後ロボット研究開発、事業化の観点からも、注目すべきエリアであるといえる。今後このコミュニティが日本のロボット研究開発を、特にソフトウェアの面でリードすることが期待される。

文 献

- (1) OpenRTM-aist official website: <https://opentrm.org>
- (2) OMG available specification, "Robotic Technology Component Specification version 1.1", formal/12-09-01, <http://www.omg.org/spec/RTC>
- (3) Choreonoid ホームページ, <https://choreonoid.org/ja/>
- (4) The Robot Operating System (ROS), <https://www.ros.org/>
- (5) OpenRTM-aist Python 用 Paho MQTT 通信モジュール, https://github.com/dyubicuoa/OpenRTM_aist_paho_mqtt_interface
- (6) RTC-Library-FUKUSHIMA, <https://rtc-fukushima.jp/>
- (7) "サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク version 1.0", 経済産業省 商務情報政策局, サイバーセキュリティ課, 2019
- (8) NEDO DRESS (Drones and Robots for Ecologically Sustainable Societies project), <https://nedo-dress.jp/>
- (9) 奥村 洋, "CPS 研究の世界的潮流と日本の現状", 研究 技術 計画, Vol.32, No.3, pp.251-265, 2017
- (10) "Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview", NIST Special Publication 1500-201, 2017

5.2. ロボットシミュレータ Choreonoid と会津大学のロボット研究

株式会社コレオノイド 中岡 慎一郎

概要：ロボットの研究開発や運用を効率的に進めるためのツールとしてロボットシミュレータへの期待が高まっている。オープンソースソフトウェアとして公開されているロボットシミュレータである Choreonoid (コレオノイド) も、この期待に応えるべく精力的な開発が続けられており、会津大学のロボット研究においてもこのシミュレータが活用されている。本稿ではこの Choreonoid の概要と、会津大学のロボット研究との関り、および今後のロボットシミュレータ活用の展望について紹介する。

1. ロボットシミュレータ Choreonoid

Choreonoid (コレオノイド)⁽¹⁾ はロボットのシミュレーションを行うためのソフトウェアである。図1にその画面を示す。Choreonoidは元々産業技術総合研究所(産総研)のヒューマノイドロボット研究の一環として開発されたもので、ヒューマノイドロボットの複雑な構造や多様なセンサに対応し、それらを用いた高度な動作やタスクのシミュレーションも実現できるように改良が続けられてきた。

この特性が評価され、また2011年よりオープンソースソフトウェアとして一般にも公開されている⁽²⁾ こともあり、Choreonoidは国内外のロボット関連機関において広く利用されてきた。そこで発生するユーザーの要望に応えるための改良が続けられており⁽³⁾、現在はヒューマノイドロボットにとどまらない多様な形態のロボットや用途に対して活用の幅が広がっている。その結果、数あるロボットシミュレータの中でも性能、機能、拡張性において優れており、実績も豊富なロボットシミュレータとなっている。

2019年4月には著者が立ち上げた「株式会社コレオノイド」による事業化活動も開始され、このソフトウェアの改良と活用を進める取り組みが精力的に行われている。

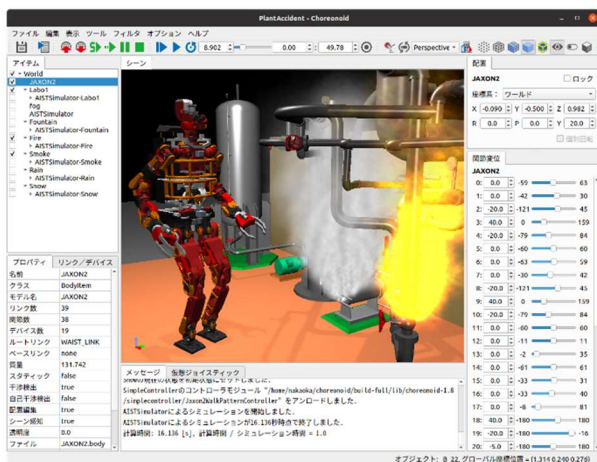


図1. ロボットシミュレータ Choreonoid の画面

2. 会津大学と Choreonoid の関り

会津大学と Choreonoid の関りは、会津大学の「産学ロボット技術開発支援事業」(事業 Stage I) において、産総研が受けていた技術コンサルティングの一環として始まった。また2017年度には福島県の公募事業「模擬プラント用ロボットシミュレータ開発業務」に会津大学も参画し、産総研や株式会社 FSK らと共に、福島ロボットテストフィールド用のロボットシミュレータを Choreonoid ベースで構築する事業に取り組んだ。その後「産学連携ロボット研究開発支援事業」(事業 Stage II) の中で2019年度から「Choreonoid 関連技術支援業務」を弊社が承るとともに、引き続き Choreonoid の活用を進めていただいている。

その間、国際ロボット競技会 World Robot Summit (WRS)⁽⁴⁾ の一競技である「トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ」に会津大学を中心とするチームが参加している。これは Choreonoid を用いたシミュレーションによって実施される競技であり、参加チームはシミュレータの中で災害対応の様々なタスクをこなすというものである(図2)。この競技への参加を通して会津大学のロボットシミュレータに関する知見と技能が深まることとなり、実際に会津大チームは2018年開催の WRS2018 のシミュレーション競技で優勝という成績を収めている。そこで培われた経験のもと、事業 Stage II で実施されている複数のプロジェクトで Choreonoid が活用されてきた。



図 2. WRS2018 トンネル事故災害対応・復旧チャレンジ

3. 災害対応ロボットのシミュレーション

会津大学における Choreonoid 活用事例として、災害対応ロボットのシミュレーションを挙げることができる。具体的には、株式会社アイザックによって開発された”SPIDER”ロボットのシミュレーション用モデルが構築され、このロボットの様々なシミュレーションが可能となった。このモデルを図 3 に示す。

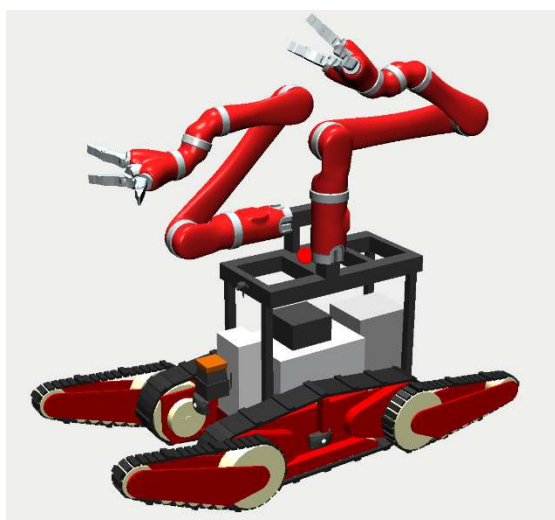


図 3. SPIDER のシミュレーションモデル

このモデルの初期バージョンの開発は、前述の「模擬プラント用ロボットシミュレータ開発業務」の一環として実施された。CAD モデルからエクスポートされた各パーツのメッシュファイルと、ロボットの関節構造や物理パラメータを記述した Choreonoid のモデルファイルを組み合わせることにより、実機と同様に動作可能なモデルが構築されている。

各パーツの形状はメッシュファイルによるものに加えて、複数のプリミティブ形状を組み合わせた近似形状によるものも導入している。前者はモデルの描画用に使用し、後者は物理計算における干渉判定に使用する。この使い分けによって、実機に近い外観と、高速かつ安定なシミュレーションを実現している。

このようなシミュレーション用モデルの構築にはそれ特

有の技能が必要とされるが、関係機関の研究者・エンジニアにこの技能を習得していただいた結果、現在では新たなロボットモデルの構築も問題なく行えるようになっている。

この取り組みにおいては商用の物理エンジンライブラリである “AGX Dynamics”⁽⁵⁾ も活用された。これはスウェーデンの Algorix 社が開発したもので、高精度で安定な物理計算が可能なのである。この物理エンジンを利用するための Choreonoid プラグインの開発も「模擬プラント用ロボットシミュレータ開発業務」において実施され、Choreonoid 上でもこのエンジンを利用できるようになった。この効果のひとつとして、災害対応ロボットで一般的なクローラ機構を実機に

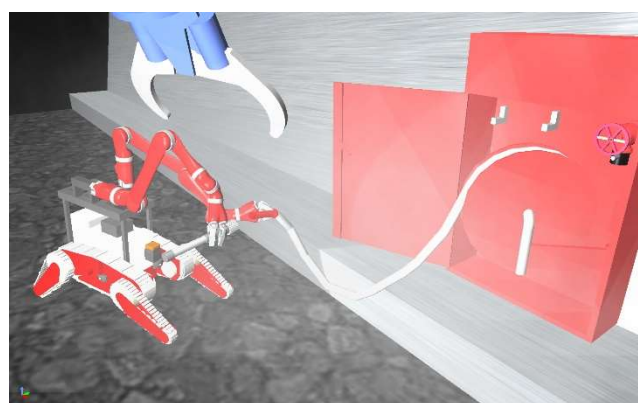


図 4. SPIDER による消火作業のシミュレーション

近いかたちでシミュレートすることも可能となった。構築した SPIDER モデルはこの機能も活用できるものとしており、クローラ特有の動作についても高精度で検証できるようになってきている。

SPIDER のシミュレーションモデルは WRS2018 の標準モデルとしても採用され、会津大以外にも多くの参加チームがこのモデルを利用した。その結果、競技を通してこのロボットの様々なタスク遂行能力が実現されてきた。その一例である消火タスクの場面を図 4 に示す。ここでは SPIDER が消火栓の扉を開けてホースを取り出し、その先端にノズルを付けて、放水の準備をしている。この後重機型のロボットと連携して消火作業を行う。このような災害対応ロボットの高度なタスクをシミュレータ上で実施できるようになったことは大きな成果である。これによってロボットの実機を動かすことなくロボットシステムの開発・検証を行うことができるので、高度なタスクへの対応も従来より効率的に進めることが期待できる。

4. ロボット用ミドルウェアとの連携

事業 Stage I、II はともに OpenRTM をはじめとするロボット用ミドルウェアを活用することに注力してきた。これを踏まえて、ロボットシミュレータとロボット用ミドルウェアを連携させる取り組みも進められてきた。

まず Choreonoid と OpenRTM を連携させる取り組みが行われた。これは Choreonoid の「OpenRTM プラグイン」によって実現することができる。このプラグインの機能によって、Choreonoid 上の仮想ロボットの入出力を RT コンポーネント (RTC) の入出力と接続できるようになり、RTC で構築されたロボットシステムを実機と同様にシミュレートすることが可能となる。会津大学においてこの取り組みは前述の WRS2018 参戦の一環として実施された。この中で SPIDER をはじめとする災害対応ロボットの遠隔操作を行うシステムが RTC によって構築され、Choreonoid 上で実行されるシミュレーションでも利用できるようになった。このシステムは実際に WRS2018 の競技において利用されており、WRS2018 の優勝という成績からも、このシステムが想定通りに機能したことが分かる。

その後 WRS2020 の参戦に向けて、新たな取り組みとして ROS で構築したシステムの導入が実施された。Choreonoid は ROS に関しても「ROS プラグイン」によって連携することが可能となっており、ROS のトピックやサービスを用いて仮想ロボットとの入出力を行うことができる。この機能を用いて、ROS ノードで構築した遠隔操作システムによって Choreonoid 上の仮想ロボットが制御できることが確認された。なお、WRS2020 の本戦は延期となったためまだ実施されていないが、2021 年度に実施される予定となっており、そこでの活躍が期待される。

事業 Stage I、II においては以上の経験を通して OpenRTM や ROS を用いたロボットシステム構築にシミュレーションの面からも精通することとなり、会津大学のロボットミドルウェアに関する知見や技能がより深まったのではないかと思われる。

5. Choreonoid の利用に関する支援

上記の活動は著者をはじめとする Choreonoid 開発者と共に進められてきた。活動の当初は著者が所属する産総研との連携であったが、2019 年度からは株式会社コレオノイドが会津大学から「Choreonoid 関連技術支援業務」の委託を受けるなどして引き続き支援を行っている。その中で Choreonoid の使用に関する質問対応やアドバイス、機能開発、不具合修正等が実施されてきた。個別の支援内容としては以下のような項目が挙げられる。

- ・ Choreonoid の最新動向の紹介
- ・ Choreonoid の機能・活用方法の紹介。Python スクリプトの活用やコントローラのデバッグ方法等
- ・ Choreonoid 上で ROS を使用する方法に関する講習会

- ・ 三次元点群データの読込・表示に関するアドバイスと改良
- ・ 接触に関するパラメータの説明および調整
- ・ シミュレーション競技交流会の支援

この取り組みがロボットシミュレータの活用を促進し、ひいてはロボットの研究開発や運用の効率化につながれば幸いである。実際に Stage II の各プロジェクトにおいて具体的なシミュレータの活用事例もあり、成果が出てきていると感じている。各活用事例については本報告書における該当機関の報告を参照されたい。

またこのような支援活動は Choreonoid 開発側にとっても様々な気付きを得るよい機会となっている。実際に、不具合やバグの発見につながったり、機能やマニュアルでどこを改善すべきか分かったり、使用事例に関する新たな知見を得るといった恩恵を受けてきた。そのような気付きを今後の開発にも活かしていき、より使い勝手がよく有用なシミュレータの実現につなげていきたいと考えている。

6. 今後の展望

ロボットシミュレータを活用できる領域としては、災害対応ロボットに加えて、産業用ロボットも有力である。小型・安価・安全で使い勝手のよい協働ロボット製品の充実や、人手不足などの社会背景により、これまででない分野や作業に対する産業用ロボットの活用が近年大いに期待されている。ロボットシミュレータによってロボット導入の事前検証や作業教示を効率的に実施することができれば、多様な分野や作業への適用も進めやすくなるはずである。そこには潜在的な大きな需要があると考えられるし、それを満たすことができれば事業としても成り立つことが期待できる。この実現に向けた取り組みを、今後本事業の関係機関や福島県のロボット関連企業とも連携しながら進めていければと考えている。

文 献

- (1) 中岡慎一郎: "拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid", 日本ロボット学会誌, vol.31, no.3, pp.12-17, 2013
- (2) <http://choreonoid.org>
- (3) 中岡慎一郎: "統合ロボットシミュレータ Choreonoid の最新機能", 計測と制御, Vol.57, No.10, pp.700-705, 2018.
- (4) <https://worldrobotsummit.org/>
- (5) <https://www.algoryx.se/agx-dynamics/>

6章 会津大学産学連携ロボット研究開発支援事業

会津大学 復興支援センター 特任教授/統括プログラムマネージャー

屋代 眞

概要：会津大学のロボット研究開発支援事業は福島県ロボット産業推進室の支援を受け 2015 年 4 月から 2018 年 3 月までのステージ 1 を経て 2018 年 4 月に開始された。著者はプログラム・マネージャーとして事業全体を推進してきた。本稿ではソフトウェアの標準化を核としてスタートした事業が、実空間と仮想空間を統合して複数台のロボットと仮想空間とが一つのシステムとして機能するための技術開発事業に発展し、それに伴い人材育成の幅も増えていったことを俯瞰するとともに、事業を進めるための基盤となった産学連携やその手法について概説する。

1. 会津大学産学連携ロボット研究開発支援事業

会津大学は約 100 名の研究者を擁し、学生は一学年 240 名でコンピューターサイエンスを専門領域としている。福島県イノベーションコースト構想⁽¹⁾の柱の一つであるロボット・ドローンの産業集積を支援するために、2015 年から 2017 年までの 3 年間、産学ロボット技術開発支援事業として福島県から支援を受けて、産学連携の体制を築いてロボット技術の研究開発を進めることになった。2018 年から 2020 年の 3 年間は同様に産学連携ロボット研究開発支援事業として発展的に継続することとなった。

ロボット技術は材料工学、機械工学、電気電子工学、ソフトウェア工学等、幅広い技術の統合で、多様な分野の技術者の連携が必要となる。会津大学は産学連携による研究活動を積極的に進めており 2020 年には経済産業省の「J-Innovation HUB 地域オープンイノベーション拠点選抜制度」で地域貢献型の拠点として選抜されている⁽²⁾。本事業においても幅広い技術を集積して研究開発を進めると共に、事業参画による企業及び企業の人材育成に資するために産学連携による事業の推進を行ってきた。

2. Stage I: 2015-2017

前述のようにロボットは多様な技術の集積によりひとつのシステムとして機能する。多くの家電や自動車等と同様に当初は機械や電気電子部品によるシステムの制御が開発に



図 1. 援竜

における大きな比重を占めていたが、半導体技術の進化とともにソフトウェアによる制御や付加価値が重要性を増し、それに伴いプログラムのサイズも巨大になってき

ている。巨大なソフトウェアを必要とするシステムに共通の

課題であるプログラムの再利用とそのため標準化などが重要になる。Stage I では震災の経験から災害対応におけるロボットの活用を目標とし、今後重要度を増してくるソフトウェアの標準化等に焦点を当てて研究開発を進めてきた。



図 2. Spider

上記を実現するために Stage I は以下の方針で企業と大学間で定期的に情報交換を行いながら進めてきた。

- 災害対応ロボットとロボット制御・知能化の技術研究・開発
- ソフトウェアの標準化 (Open-RTM) と「RTC-Library-FUKUSHIMA」におけるソフトウェア成果物の公開
- ソフトウェアの標準化と RTC-Library-FUKUSHIMA を活用した人材育成
- 産学連携を通じた技術研究・開発と産業育成

Stage I でロボットのプラットフォームとして開発したロボットの例を紹介する。図 1 は「援竜」と呼ばれる大型のクローラタイプの災害対応ロボットで屋外の災害現場などで



図 3. 複数台ドローンネットワーク

遠隔操作により動作する。図 2 は「Spider」と呼ばれる小型の災害対応ロボットで屋内も含む災害現場などで遠隔操作により動作する。制御のためのソフトウェアはロボットのミドル

ウェア標準 OpenRTM に準拠した OpenRTM-aist⁽³⁾に基づいて開発し、援竜と Spider で共通のゲームコントローラを使った操縦ができるなどソフトウェアの共有を実現している。図 3 はケーブルで繋がった複数台のドローンネットワークを構築したもので、お互いの位置関係を認識しながら一つのシステムとして飛行している。

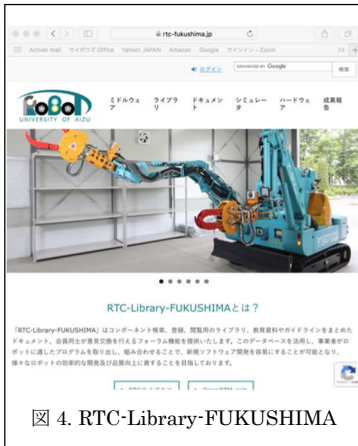


図 4. RTC-Library-FUKUSHIMA

Stage I で研究開発してきた成果はホームページ RTC-Library-FUKUSHIMA (図 4) で公開し、成果の共有を行い、2021 年 2 月までに 144 件のソフトウェア部品を公開している。事業の一環として提供してきた社会人向けのロボット技術研修、県の主催する人材育成での活用なども行ってきた。

図 5 に Stage I の、方針の概念図を示す。また、Stage I の事業を通じて、インターネットを経由したクラウド側とロボット側のソフトウェアの協調したシステムの考え方 (Cloud Robotics)、それに伴うネットワーク技術、ロボットから入ってくる大量のデータの取扱い、シミュレータ技術などを活用した実世界と仮想世界を融合させたロボット技術 (Dual-Space Robotics) などが今後の重要なロボット技術として明らかになってきた。また、産業育成の観点では災害対応ロボットにとられないロボット技術の研究開発が必要になってきた。

Stage I の具体的な成果に関してはホームページ「会津大学ロボット事業と産学連携⁽⁴⁾」および「2015 年度-2017 年度 産学ロボット技術開発支援事業 成果報告書⁽⁵⁾」を参照いただきたい。

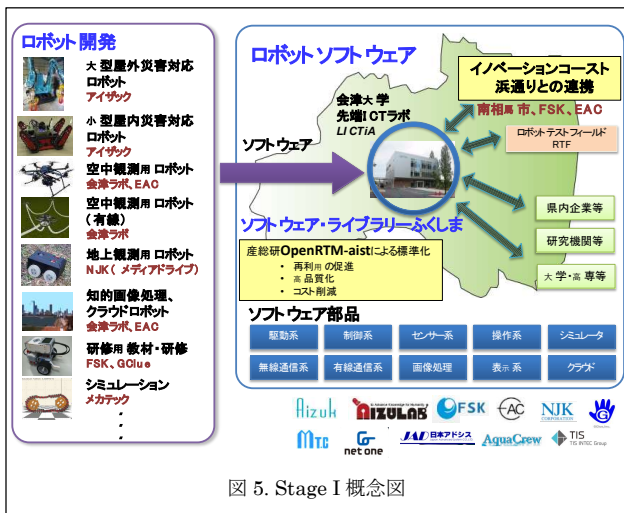


図 5. Stage I 概念図

3. Stage II: 2018-2020

(3-1) Stage II の事業内容

Stage II は産学連携ロボット研究開発支援事業として、Stage I を発展させた形で 2018 年度から実施されてきている。Stage I における標準に基づいたソフトウェア開発、成果物の RTC-Library-FUKUSHIMA を通じた公開などを継承しながら、災害ロボットからサービスロボットへの技術の展開、前述のクラウドロボティクス (Cloud Robotics) およびその中で必要となるロボットデータベース (RDR: Robot Data Repository)、セキュリティ、さらにデュアルスペースロボテ

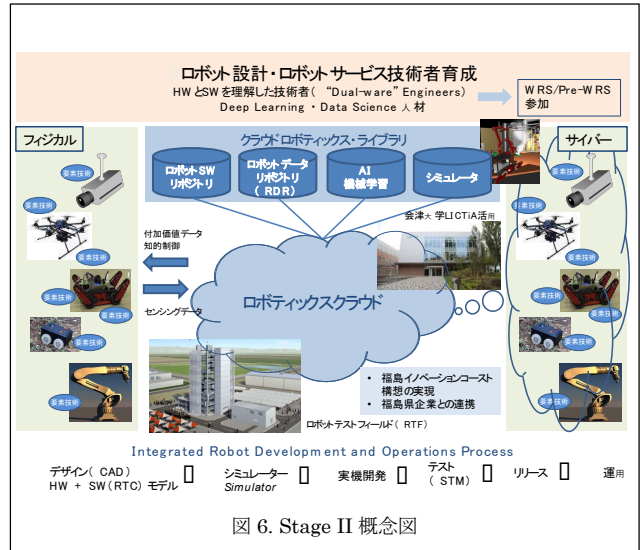


図 6. Stage II 概念図

イクス (Dual-Space Robotics) とその中核の技術となるシミュレーション等の技術を研究開発の中心として進めてきた。また、ロボットの知能化や AI の活用も取り入れてきている。図 6 に Stage II の考え方の概念図を示す。

人材育成ではロボットのハードウェアとソフトウェア両方を理解してロボットシステムを俯瞰できる人材 (Dual-ware Engineer) の育成、またシミュレータの活用を力を入れてロボット技術教育を展開し、通算で 12 回、約 170 人が参加した。

図 7 に Stage II における具体的な研究開発の項目を図示しているが、個々の内容については Stage II の成果報告集に別途詳細な解説があるのでここでは図での項目例示に留める。



図 7. Stage II の主な技術研究開発

図 8 は左側の実機の映像と右側のシミュレーションの画像とを示しているが、実空間と仮想空間を併用することにより、操縦者の訓練、操縦支援、機械学習、両空間の統合による新たなシステムづくり等、様々な応用が考えられる。今までは

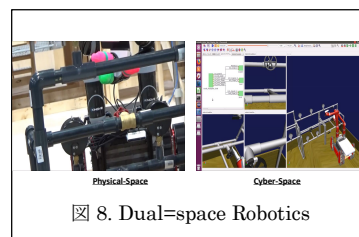


図 8. Dual=space Robotics

ICT による仮想空間と実世界は完全に分離されていたが、IoT やロボットの技術により両空間を接続して一体化することができるようになった。

〈3・2〉 Stage II の体制

Stage II では福島県の企業 7 社及び首都圏の企業 2 社とともに共同研究を進めてきた。ロボット技術に精通している産業技術総合研究所とロボットシミュレータのベンチャーである株式会社コレオノイドにも参画を仰ぎ最先端の技術の紹介や会津大学のプロジェクトのベンチマークを行うなどして進めてきている。この他に福島県内でロボット事業に興味をもつ企業や会津大学の教員・研究員をメンバーとして ARDuC 研究会 (Aizu Robotics Dual-ware Conference) を形成して月 1 回の会議を行って情報交換を進めてきた。共同研究の進捗やロボット技術に関する情報交換・意見交換などを行い、事業の進捗管理、各メンバーの情報収集支援、新規技術に向けての議論などを行ってきた。

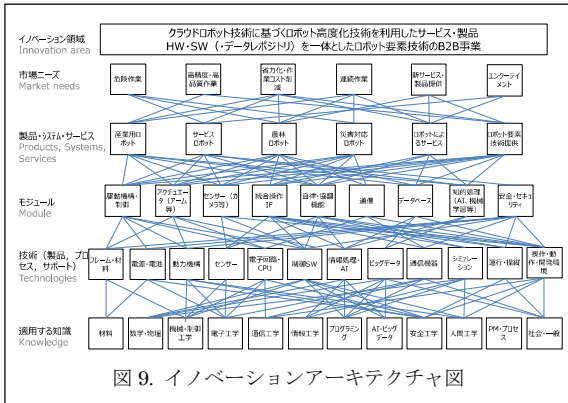


図 9. イノベーションアーキテクチャ図

各企業が本事業での共同研究を通じて更にロボット関連の技術や業界への理解を深め、将来ロボット事業に取り組んでいくことを期待しているが、その考え方を支援するために、図 9 に例として示すようなイノベーションアーキテクチャの考え方を導入し、それぞれの技術分野に関する事業展開を検討しながら事業を進めてきた。

〈3・3〉 WRS2020

ロボット事業の成果の確認と学生の事業参画を促すためロボットの競技会である WRS2020 及び 2018 年に行われたプレ大会に参加した。会津大学はいずれも STM と呼ばれる実機を使い競技コースで設定された作業を遠隔で行う災害対応標準性能評価チャレンジ、およびシミュレーター上で作成したソフトウェア、ロボットモデル、操縦技術などを競うトンネル事故災害対応・復旧チャレンジの 2 部門に参加した。WRS2020 は 2020 年度に行われる予定だったが、延期され現時点で開催日未定となっている。プレ大会ではトンネル事故災害対応・復旧チャレンジ部門で会津大学チームが優勝した (図 10)。



図 10. WRS2020 プレ大会

〈3・4〉 RTF オフィス

福島県は 2019 年 9 月、南相馬市に福島ロボットテストフィールド (RTF) を開設した。会津大学は本ロボット事業で加速されたロボット研究やロボットに関する産学連携を更に進めていくことと浜通りの復興により大きく寄与していくことを目指して、RTF 開設当初より研究棟に常駐の教員・事務員を配置し RTF を活用したロボット研究・教育・産学連携を進めている。会津大学にとっては会津若松市の 4 年制及び短大以外に設ける初めての事業所で、世界でも類のない RTF のロボット用実験施設を活用し、今後発展が期待される浜通りでのロボット人材・ロボット産業育成に貢献している。

〈3・5〉 復興知事業

本事業での様々な研究成果や開発された教材などは本事業以外にも生かされている。福島イノベーション・コースト構想推進機構が実施している復興知事業には当初の 2018 年から参加し、南相馬市の高校生や専門学校の学生を対象にロボット技術やプログラミング技術の若手人材育成を行い、延べ 31 回、約 350 人が参加した。ここでも産学連携による事業展開を行い地元の南相馬ロボット産業協議会及びそのメンバー企業との連携により実施してきた。

4. 会津大学ロボット技術の今後

会津大学では今まで見てきたようにロボット技術を ICT の世界をロボットや IoT を通じて実世界と結びつけたデュアルスペースロボティクス (Dual-Space Robotics: DSR) の技術とし統合的に捉え、今後も必要な技術を研究し、産学連携の枠組みを活用して研究開発と産業及び人材育成へとつなげていくことを計画している。学内にはロボットの他にクラウドコンピューティング、医学・医療、宇宙情報科学、ハイパフォーマンスコンピューティング、AI などのプロジェクト型研究グループが形成され、それぞれの分野の研究を進めている。いずれも ICT 技術を中心に据えた研究グループであるが、今後は ICT とロボット技術を統合した DSR の研究を進めるのと共にそれぞれのグループとの協業を進めて行きたい。

また、FA (Factory Automation) 分野への応用なども重要であり、With/After コロナ時代のロボット技術開発としての“人・物に触らないタッチレス技術”、“サイバー空間を駆使した実空間の再構築 (サイバーフィジカルスペース: CPS)”、“安全安心なロボット (サイバーセキュリティ)”なども主要な研究テーマとなってくる。

5. おわりに

ロボットは多くの技術から成り立っており、ロボットシステムにおいて将来は情報工学技術が重要な柱になることから、情報工学を中心とした会津大学では情報工学の視点でロボットシステムに関する多くの分野の技術を見直し、産学連携のコミュニティを形成しながら研究開発や企業・人材育成を進めてきた。本稿ではその概要を俯瞰し ICT とロボット技術に関わる様々な基本技術に基づいた DSR (Dual-Space Robotics) の考え方で発展してきた事を見てきた。DSR の考え方は見方を変えればロボットを通じて ICT が実世界まで包含する技術であり、今後は DSR (Dual-Space Robotics) の視点から研究開発してきた技術や考え方をロボット以外の様々な分野へ応用を広げると同時に、ロボットに関する個々技術の研究開発も進め、人材育成とともに社会や産業への貢献を目指して行く。

今年は震災からの復興 10 年でもあり、会津大学を中心としたこのような産学連携による研究開発の継続は福島県の復興の柱となるものと考えている。

文 献

- (1) (公財) 福島イノベーション・コースト構想推進機構. (2021 年 2 月 2 日). 福島イノベーション・コースト構想. 参照先: <https://www.fipo.or.jp>
- (2) 経済産業省. (2021 年 2 月 2 日). J-Innovation HUB 地域オープンイノベーション拠点. 参照先: <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201224004/20201224004.html>
- (3) 産業技術総合研究所. (2021 年 2 月 3 日). OpenRTM-aist. 参照先: <https://www.openrtm.org/openrtm/>
- (4) 会津大学. (2021 年 2 月 3 日). 【2015 年-2017 年】会津大学ロボット事業と産学連携. 参照先: <https://rtc-fukushima.jp/report/2015-2017-aizu-robot-collaboration/>
- (5) 会津大学. (2021 年 2 月 3 日). 2015 年度-2017 年度 産学ロボット技術開発支援事業 成果報告書. 参照先: https://www.u-aizu.ac.jp/2015_17Robotreport.pdf

プロジェクトメンバーリスト

公立大学法人会津大学

理事兼復興支援センター長	岩瀬 次郎
復興支援センター 特任教授	屋代 眞
情報システム学部門 ロボット工学講座 教授	成瀬 継太郎
情報システム学部門 データベースシステム学講座 上級准教授	渡部 有隆
コンピュータ・サイエンス部門 情報セキュリティ学講座 上級准教授	中村 章人
情報システム学部門 ロボット工学講座 准教授	矢口 勇一
情報システム学部門 データベースシステム学講座 兼 復興支援センター 准教授	中村 啓太
復興支援センター 准教授	山田 竜平
産学イノベーションセンター 准教授	畠 圭佑
復興支援センター 特別研究支援者	吉野 大志
復興支援センター 特別研究支援者	Akila Siriweera
復興支援センター 事務次長	戸城 和幸
復興支援センター 係長	大堀 穰
復興支援センター 主査	横山 茂行
復興支援センター 主事	齋藤 旭
復興支援センター 特定プロジェクト支援者	伊達 美樹
復興支援センター 特定プロジェクト支援者	渡部 恵里花
復興支援センター 臨時事務補助員	栃久保 和恵

株式会社アイザック

代表取締役社長	三好 眞夫
総務部 担当課長 (企画・営業)	馬場 法孝
研究開発1課 担当部長	本木 保成
電気制御課 主任	石川 淑
電気制御課	齋藤 千明

株式会社社会津ラボ

ソリューション事業部 取締役	遠藤 貴幸
ソリューション事業部	石川 慧
ソリューション事業部	山口 幸則

株式会社 FSK

産業システム部システム開発課 課長	荒川 弘栄
産業システム部システム開発課	馬上 雄
産業システム部システム開発課	穴澤 剛士
産業システム部システム開発課	蛭田 聡
産業システム部システム開発課	軒澤 沙織
営業システム部営業3課 課長	小林 剛

株式会社東日本計算センター

R&D センター 執行役員フェロー R&D センター長 (兼)ながとイノベーションセンター 副センター長	中野 修三
エンベデッドシステム事業部 グループマネージャー	鈴木 教文
エンベデッドシステム事業部 チームサブリーダー	丹内 智博
エンベデッドシステム事業部	菊地 浩之

株式会社 NTT データ NJK

デバイスコミュニケーション営業部 部長	松下 努
---------------------	------

株式会社 GClue

代表取締役	佐々木 陽
取締役	高野 康
	穂積 智

株式会社メカテック

代表取締役	笠間 啓造
技術部 技師	二瓶 泰治
技術部 取締役	那知上 剛
営業部 取締役	斎藤 使途

ネットワンシステムズ株式会社

フィールドマーケティング部 シニアエキスパート	辻 秀典
東日本第1事業本部第3営業部 部長	斉藤 誠吾
フィールドマーケティング部 エキスパート	山崎 治郎
ネットワンビジネスオペレーションズ合同会社 事業企画部	山崎 文明
第1応用技術部 エキスパート	久田 勇気
先端技術戦略室 エキスパート	東根 真司
フィールドマーケティング部 マネージャー	横溝 直樹

株式会社日本アドシス

システム営業部 課長	増子 智昭
システム技術部 主任	影山 博昭
システム技術部	馬場 良弘
システム技術部	熊田 誠也

アクアクルー株式会社

代表取締役 社長	菊地 稔
システム課 主任	佐藤 彰

TIS 株式会社

デジタル社会サービス企画部 エキスパート	石橋 靖嗣
デジタル社会サービス企画部 エキスパート	松井 暢之
デジタル社会サービス企画部 主任	占部 一輝
デジタル社会サービス企画部 補佐	坂本 諒太

福島コンピューターシステム株式会社

ICT ソリューション事業部 プロジェクトリーダー

永井 朝祐

ICT ソリューション事業部 チーフ

橋本 瑞樹

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

インダストリアル CPS 研究センター 研究チーム長

安藤 慶昭

株式会社コレオノイド

代表取締役

中岡 慎一郎



2018年度-2020年度 産学連携ロボット研究開発支援事業 成果報告書

問合せ：会津大学復興支援センター（0242-37-2533）
2021年3月発行