

協調安全実現に向けたリアルタイムデジタルツイン基盤の開発

西 口 仁 視・坂 元 淳 一・岩 田 亮 介

「人、機械、現場環境」の情報を相互に共有することで、人と機械が協調して働き、安全性と生産性を両立する「協調安全」の施工現場の実現をめざしている。「協調安全」の施工現場を構築するためのリアルタイムデジタルツイン基盤に関し、IoT データの収集・配信ミドルウェアである intdash と、ロボット開発に使用するオープンソースのフレームワークである ROS 2 を用いてそのプロトタイプシステムを開発し、実証試験を実施した。その結果、開発したプロトタイプで、施工現場のデジタルツインに必要な、建設機械の位置・稼働情報、周囲の3次元地形情報など、多種多様な情報をリアルタイムに共有できることを確認した。

キーワード：協調安全、ICT、デジタルツイン、遠隔化、自律化

1. はじめに

近年、建設業界では、入職者の減少による労働力不足が課題となっており、効率的で働きやすい施工現場の実現が求められている。こうした期待に応えるため、日立建機は「人、機械、現場環境」の情報を相互に共有することで、人と機械が協調して働き、安全性と生産性を両立する「協調安全」の施工現場の実現をめざしている（図—1）¹⁾。

実現をめざす施工現場では、作業員や、オペレータが搭乗して運転する従来の建設機械に加えて、遠隔操作や自律型の建設機械も稼働する。この施工現場においては、作業員が身に着けるウェアラブルデバイスや、建設機械に搭載されたセンサ、現場環境に設置されたセンサなどからさまざまな情報が取得される。こ

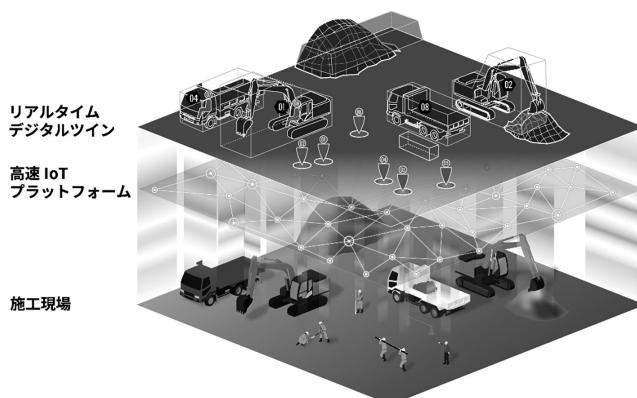
れらの情報を収集、蓄積、分析、共有することによって、人に注意を促し、建設機械の動きを制御することで、施工現場全体を安全な方向に導きながら、生産性の高い施工を行う。

このような「協調安全」の施工現場を実現するためには、時々刻々と変化する現実世界の施工現場を、デジタル空間上で再現すること（リアルタイムデジタルツイン）が必要となる。リアルタイムデジタルツイン基盤は、建設機械の位置・稼働情報、作業員の位置・生体情報、周囲の3次元地形情報など、多種多様な情報をリアルタイムに収集、分析、蓄積、共有する、デジタルツインのための高速 IoT プラットフォーム（図—2）である。

本報では、このリアルタイムデジタルツイン基盤について、システムおよび実証試験の概要を紹介する。



図—1 協調安全の施工現場のイメージ図



図—2 リアルタイムデジタルツイン基盤の概念図

2. 開発対象

(1) 協調安全と Safety2.0

「協調安全」とは、人・機械・環境が情報を共有することで、協調して安全を構築する安全の概念である²⁾。技術だけでなく、社会ルール、人材、マネジメントも含めて4つの要素が互いに情報共有し、協調することで、高いレベルでの安全性と生産性の両立をめざしている。Safety2.0は、この「協調安全」を実現するための一つの技術的手段であり、「ICTを用いて協調安全を実現する技術」と定義されている³⁾。

本報が開発対象とする、協調安全の考え方を導入した施工システムの例を図一3に示す。リアルタイムデジタルツインは、施工現場において時々刻々と変化する建設機械の位置・稼働情報、作業員の位置・生体

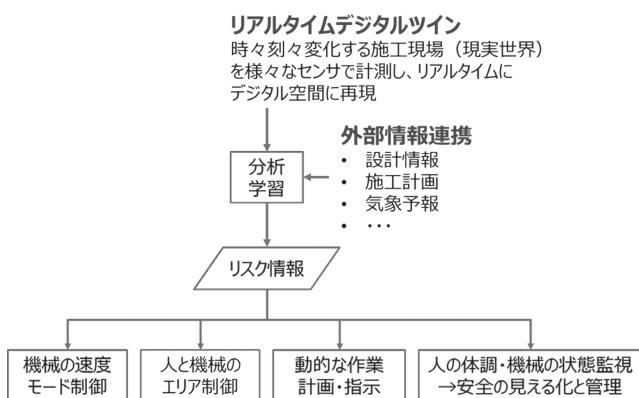
情報、周囲の3次元地形情報など、多種多様な情報を様々なセンサで計測し、リアルタイムにデジタル空間に再現する。施工システムは、リアルタイムデジタルツインと、設計情報、施工計画、気象予報等の外部情報とを分析・学習することによって、リスクを可視化し、施工現場全体を安全な方向に導きながら、生産性の高い施工を実現する。

(2) リアルタイムデジタルツイン基盤の要件と開発方針

「協調安全」の施工現場実現に向けた、リアルタイムデジタルツイン基盤に対する要件を以下に示す。

- ①機械・人・環境の情報をリアルタイムに共有できること
- ②様々なユーザが共有された情報を容易に利用できること
- ③（ユーザが）施工現場の情報を容易に追加・共有できること

要件①については、遠隔地での利用のためにインターネットを経由した通信への対応と、送信頻度・サイズがそれぞれ異なる大量のデータに対する遅延と信頼性（低欠損）とのバランスを取ったデータハンドリングを実現することが主な課題である。送受信するデータ量に応じて、適切なスループットを有するデバイスを用いてネットワークを構成することは当然であるが、多数のデバイスが大量のデータを送信することによって生じるコリジョンをどのように処理するかが



図一3 協調安全の考え方を導入した施工システムの例

表一1 プロトタイプシステムの開発方針

要件	開発方針
① 機械・人・環境の情報をリアルタイムに共有できること	1 インターネットを経由して、遠隔地でもリアルタイムにデジタルツインにアクセスできるようにする
	2 個々の施工現場の通信環境に対して適した QoS（通信の品質。速度、遅延、欠損等）を設定できるようにする
	3 必要なデータ処理はリアルタイム（規定時間内）で処理する
	4 通信遅延低減と運用コスト低減のバランスを取ったデータ処理を実現するための、エッジ・フォグ・クラウド分散処理システムとする
② 様々なユーザが共有された情報を容易に利用できること	1 既存ツール、OSS を徹底的に活用する
	2 リアルタイムデータは原則として ROS 2 で取扱う。ただし、データ伝送効率の観点から標準的な圧縮フォーマットを採用することは妨げない（動画データとして h.264 を用いる、など）
	3 必要なデータは時刻同期をとってクラウド上に格納し、過去データとして利用できるようにする
③ （ユーザが）施工現場の情報を容易に追加・共有できること	1 マルチデバイス対応：PC、タブレット、スマートフォン、ウェアラブルデバイス、組み込みコンピュータ等、デバイスを問わず接続ができるようにする
	2 マルチモーダル対応：点群、映像、位置・姿勢、制御指令などの様々なデータを統合して取り扱うことができるようにする

課題となる。

要件②については、大学やベンチャー、スタートアップ企業などを含む、様々な開発者の参画を促すために、通信ルールの標準化、統一化を進めていくこととともに、様々なデバイスから取得されたデータを時刻同期して利用可能にすることが主な課題である。

要件③については、マルチデバイス対応、マルチモーダル対応が主な課題である。

本報では、上記要件①②③に対して、表―1 に示す開発方針に沿ってプロトタイプシステムを開発し、実証試験を実施した。

3. プロトタイプシステム

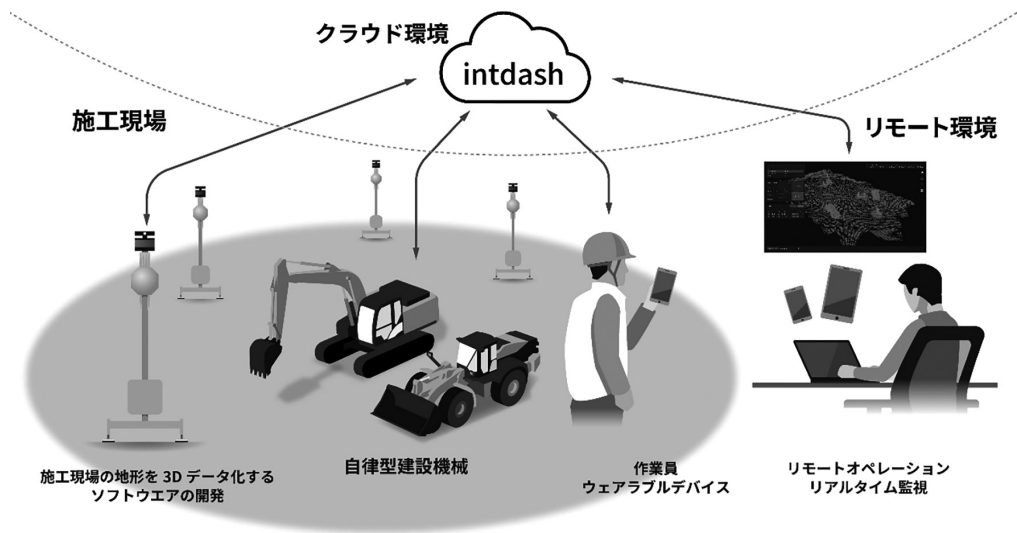
本プロトタイプシステムの構成（概念図）を図―4 に、各サブシステムの概要を表―2 に示す。各サブシステムの概要を以下に述べる。

(1) intdash

intdash は、アプトポッドにより開発された IoT データの収集・配信ミドルウェアである⁴⁾。本プロトタイプシステムにおいては、サイトセンシングシステムや作業員ウェアラブルデバイス、自律型建設機械、ユーザインタフェースなどの各構成要素間でやり取りされるデータを中継し、クラウドにデータを保存するために使用した。intdash のシステム構成（概念図）を図―5 に示す。

本ミドルウェアは、センサデータや映像・音声などの様々な種類のデータを単一システムにより収集・保存・配信可能であることに特徴を持つ。本ミドルウェアを採用することにより、現場で生成される多様なマルチモーダルデータの配信・活用に関わる API を共通化でき、システム構成の簡略化およびシステム構築の迅速化を実現した。

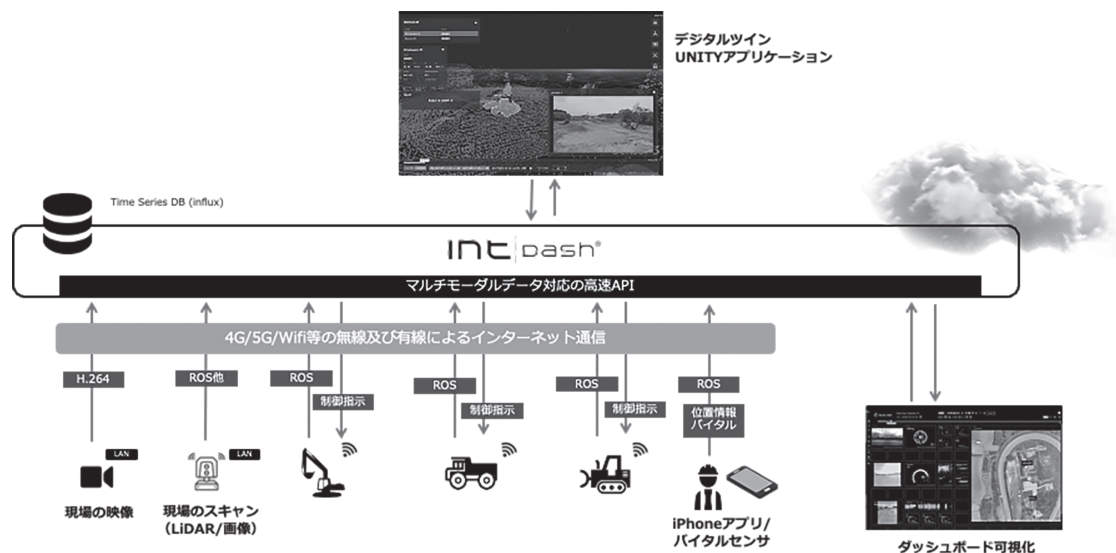
本ミドルウェアが採用する同社の独自プロトコル



図―4 プロトタイプシステムの機器構成例

表―2 サブシステムの概要

No.	名称	概要
(1)	intdash	アプトポッドが提供するマルチモーダルデータ対応の高速 IoT プラットフォーム データの収集・保存・配信をする
(2)	サイトセンシングシステム	施工現場内の 3 次元地形点群データをリアルタイムに生成する
(3)	自律型建設機械	オペレータによるアクチュエータ操作を伴わずに、システムが適切な動作を判断し、それに基づいて動作する機能を有する建設機械
(4)	作業員ウェアラブルデバイス	作業員の位置情報、映像等を取得する
(5)	リモートオペレーション リアルタイム監視 ユーザインタフェース	施工現場から収集されたリアルタイムデータの表示と、自律型建設機械への指示をリモート環境から行うための GUI アプリケーション



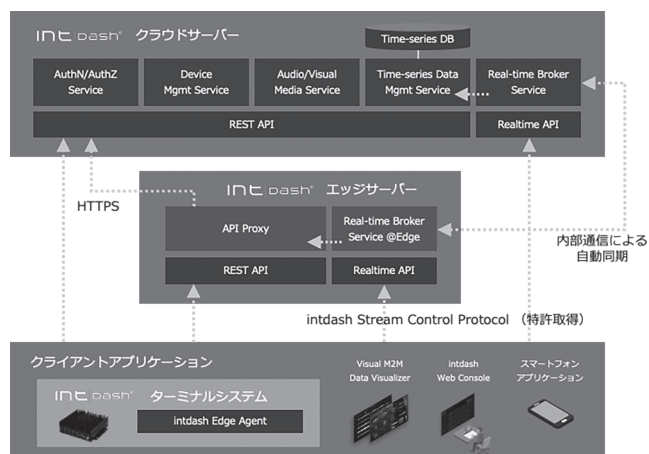
図ー5 intdash のシステム構成 (概念図)

iSCP (intdash Stream Control Protocol) は、OSI 参照モデルにおけるレイヤー 7 (アプリケーション層) におけるプロトコルである。ROS 2、映像ストリームを含む様々なデータにナノ秒精度のタイムスタンプを付与し、独自の通信フレームにカプセルリングして中継することにより、異なる種類のデータを共通の時系列・共通の API により取り扱うことができる。また、トランスポートには WebSocket Secure や TLS を含む QUIC を用いることで、セキュアな通信を実現可能である。

なお本システムにおいては、サイト内のローカル通信では高速・大容量なネットワークを確保できる一方、リモート環境にあるユーザインタフェースとの通信は通信帯域に制限のあるインターネットを介して行われる。ローカル通信における高速・大容量通信と、通信に制限のあるインターネット通信との両立のため、intdash の中継ブローカーは、サイト内に設置するエッジサーバとクラウド上に設置するクラウドサーバとに分散配置し、相互に連携する構成とした。本構成により、サイトセンシングシステムと自律型建設機械間の通信のような高速・大容量が求められる通信はサイト内に閉じ、低遅延化を実現した。クラウドサーバ、エッジサーバそれぞれの機能配置を図ー6に示す。

(2) サイトセンシングシステム

サイトセンシングシステムは、施工現場内の 3 次元地形点群データをリアルタイムに生成するシステムである。本プロトタイプシステムにおいては、点群データをリアルタイムに統合処理するためのワークステーションと、施工現場内に複数台設置するサイトセンサ



図ー6 intdash のクラウドサーバとエッジサーバの機能配置

ユニット (写真ー1) によって構成した。サイトセンシングシステムにおいて実装するソフトウェアは、汎用性、拡張性、ならびに、様々なユーザが容易に利用できるようにすることを志向し、ROS 2 に対応したシステム基盤およびデータフォーマットを採用した。ROS 2 のディストリビューションは自律型建設機械に合わせた⁵⁾。

サイトセンサユニットは①映像を取得するためのカメラ、②地形点群データを取得するための LiDAR、③点群データを一次処理するためのエッジコンピュータ、④自律型建設機械との通信を行うための Wi-Fi アクセスポイント、によって構成した。サイトセンサユニットは、固定式 (埋込ボール等に固定設置する) と、可搬式 (バッテリー電源システムと水圧式伸縮ポールとを搭載した台車に設置する) との 2 種類とした。ワークステーションと可搬式センサユニット間の通信は



写真-1 サイトセンサユニット（収納状態）

60 GHz 帯無線通信デバイスによって構成した。

各サイトセンサユニットから取得される点群データは、エッジコンピュータにおいて ROS 2 のメッセージ形式に変換し、intdash によってエッジサーバを経由してワークステーションに送信される。ワークステーションは、各サイトセンサユニットから受信した点群データの①バッファリング、②座標変換（位置合わせ）と結合、③ボクセル格子化、④機影点群除去、などの処理を行う。統合処理された地形点群データは、intdash によってエッジサーバを経由して自律型建設機械や、リモートオペレーション・リアルタイム監視ユーザインタフェースへ送信される。

本システムにより、作業の進捗によって時々刻々と変化する施工現場の地形をリアルタイムに3次元点群データとして取得することができる。取得した3次元点群データは自律型建設機械の制御や、遠隔オペレータによる監視に用いることができる。

(3) 自律型建設機械

自律型建設機械は、オペレータ操作を伴わずに、シ

ステムが適切な動作を判断し、それに基づいて動作する機能を有する建設機械である。本実証試験においては、搭乗操作／遠隔操作／自律運転を切り替えできるように、人が搭乗して操作する一般的な建設機械に自律化システムを追加する改造を実施した、油圧ショベル（バックホウ）とホイールローダを使用した。

自律化システムの汎用性を考慮し、ROS 2 に対応したシステム基盤およびデータフォーマットを採用した。位置情報・姿勢情報・その他内部状態情報を出力し、作業指示・アクチュエータ速度指令などの操作指令を入力可能なインタフェースを有する。また、遅延を低減することを意図して、到達保証はせずに最新のデータを送受信する QoS とした。

(4) 作業員ウェアラブルデバイス

作業員ウェアラブルデバイスは、作業員の位置情報、バイタルデータ、映像・音声データを送信する。本実証試験においては、iPhone を用い、アプトポッドが開発した iPhone 用アプリ「intdash Motion」をベースとし、取得したデータを ROS 2 のデータフォーマットで送信する機能を追加したアプリケーションを開発した（図-7）。

intdash Motion は、iPhone により取得した映像・音声、9 軸センサデータ、GNSS 測位データを intdash サーバへリアルタイムにストリーミング送信する。本実証試験において伝送経路は、携帯キャリアの通信網（LTE）を用いた。

(5) リモートオペレーション、リアルタイム監視ユーザインタフェース

リモートオペレーション、リアルタイム監視ユーザインタフェースは、施工現場から収集されたリアルタイムデータの表示と、自律型建設機械への指示をリモート環境から行うための GUI アプリケーションである。本ユーザインタフェースは、マルチプラットフォームに対応したゲームエンジンである Unity を用いて開発した（図-8）。

本ユーザインタフェースでは、サイトセンシングシ

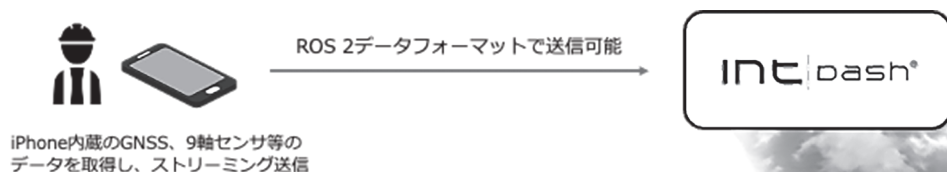
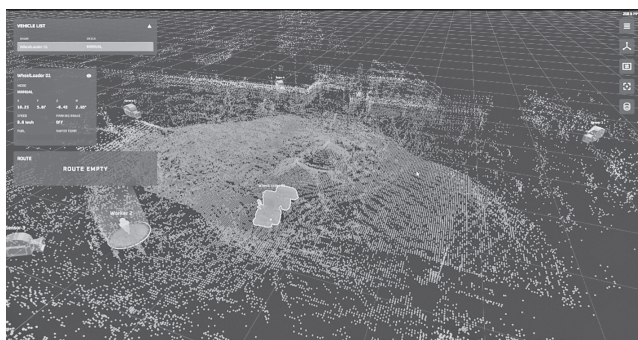
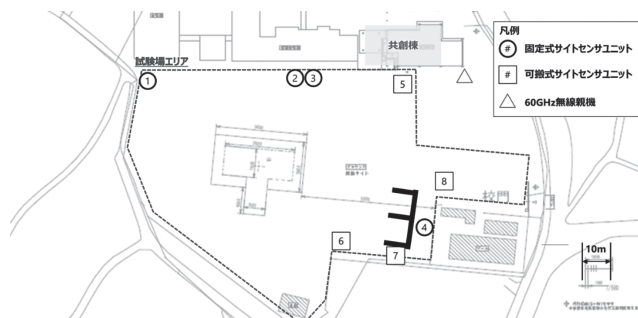


図-7 intdash Motion の概要



図—8 リモートオペレーション・リアルタイム監視ユーザインタフェース



図—9 サイトセンサユニットの配置図

システムから収集された施工現場の点群データやカメラ映像に加えて、自律型建設機械の位置情報・姿勢情報や、作業員ウェアラブルデバイスから送信された作業員の位置情報などが一つの画面に重畳されて描画される。また、画面上に配置された各種操作メニューから、自律型建設機械に対して走行経路を指定し、自律運転の開始・停止指示を行うことができる。

4. 実証試験

(1) 試験内容

実証試験は、2025年5月、日立建機かすみがうら Value Creation Hub にて実施した。本実証試験の目的は、開発したプロトタイプシステムがリアルタイムデジタルツイン基盤の要件①を満たすことを実証することである。

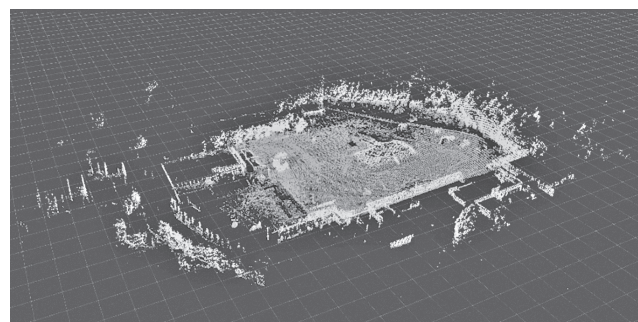
本実証試験は、以下の機器構成で実施した。

- ①自律型建設機械：ホイールローダ：1台：Wi-Fiにて無線接続
- ②固定式サイトセンサユニット：4台：10 GBase-T有線接続
- ③可搬式サイトセンサユニット：4台：60 GHz 帯通信デバイスにて無線接続

なお、intdash エッジサーバ、サイトセンシングシステムワークステーションはいずれも 10 GBase-T にて有線接続した。インターネット回線は、一般光通信回線（ベストエフォート 1 Gbps）である。サイトセンサユニットの配置図を図—9 に示す。

本実証試験では、以下を確認項目とした。

- ・各機器が正常に通信できること
- ・地形点群や自律型建設機械の位置・姿勢にスタックリング（瞬停やカクつき）がないこと



図—10 試験場エリアの地形点群

(2) 試験結果

本試験の結果、

- ・各機器が正常に通信できること
 - ・地形点群や自律型建設機械の位置・姿勢にスタックリング（瞬停やカクつき）がないこと
- を確認した。本試験において取得したサイトセンシングシステムによって統合された試験場エリアの地形点群の例を図—10 に示す。

5. おわりに

「協調安全」の施工現場を構築するためのリアルタイムデジタルツイン基盤に関し、IoT データの収集・配信ミドルウェアである intdash と、ロボット開発に使用するオープンソースのフレームワークである ROS 2 を用いてそのプロトタイプシステムを開発し、実証試験を実施した。その結果、開発したプロトタイプでリアルタイムデジタルツイン基盤の要件を満たすことを確認した。

リアルタイムデジタルツイン基盤は、「協調安全」の施工現場の実現に向けたオープンイノベーションの基盤である。今後は、プロトタイプをベースとした改良に加え、これを利用して、様々な企業・組織とのオープンイノベーションを加速させていく所存である。

《参考文献》

- 1) 日立建機 Web サイト, 日立建機が思い描く将来の施工現場,
<<https://www.hitachicm.com/global/ja/innovations/innovations01/>>
- 2) (一社) セーフティグローバル推進機構 Web サイト, 協調安全とは,
<<https://institute-gsafety.com/certification/safety2/>>
- 3) IDEC (株), 協調安全 Safety2.0 ガイドブック,
<<https://jp.idec.com/media/jp/F3002-Guidebook-collaborative-safety.pdf>>
- 4) アプトポッド Web サイト, IoT プラットフォーム構築用ミドルウェア intdash,
<<https://www.aptpod.co.jp/products/software/intdash/>>
- 5) Open Robotics, ROS 2 Documentation: Humble,
<<https://docs.ros.org/en/humble/index.html>>

[筆者紹介]

西口 仁視 (にしぐち ひとし)
日立建機(株)
研究・開発本部オープンイノベーション推進室
主任技師
技術士(機械部門)



坂元 淳一 (さかもと じゅんいち)
(株)アプトポッド
代表取締役 CEO



岩田 亮介 (いわた りょうすけ)
(株)アプトポッド
開発本部
執行役員 VPoP

