

土工現場向けCPS プラットフォーム ROS2-TMS FOR CONSTRUCTION の開発

－ プラットフォームの概要と適用事例 －

○ 笠原侑一郎^{*1 *4}, 高野智也^{*1}, 秋成光太^{*1}, 八條貴誉^{*2}, 木村駿介^{*2},
深瀬勇太郎^{*2}, 宮下裕貴^{*2}, 横島喬^{*2}, 阿部太郎^{*3}, 遠藤大輔^{*3}, 橋本毅^{*3}, 永谷圭司^{*5},
山内元貴^{*3}, 倉爪亮^{*6}

ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites
-- Overview of the Platform and Application Examples --

Yuichiro Kasahara^{*1 *4}, Tomoya Kouno^{*1}, Kota Akinari^{*1}, Takayoshi Hachijo^{*2}, Shunsuke Kimura^{*2}, Yutaro Fukase^{*2}, Yuki Miyashita^{*2}, Takashi Yokoshima^{*2}, Taro Abe^{*3}, Daisuke Endo^{*3}, Takeshi Hashimoto^{*3}, Keiji Nagatani^{*5}, Genki Yamauchi^{*3}, Ryo Kurazume^{*6}

^{*1}九州大学大学院 システム情報科学府,
Kyushu University, Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering (ISEE)

^{*2} 清水建設株式会社 技術研究所 ロボティクス研究センター,
Shimizu Corporation, Institute of Technology, Robotics Research Center

^{*3} 国立研究開発法人 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム,
Public Works Research Institute (PWRI),

^{*4} 筑波大学大学院 理工情報生命学術院,
University of Tsukuba, Graduate School of Science and Technology

^{*5} 筑波大学 システム情報系,
University of Tsukuba, Institute of Systems and Information Engineering

^{*6} 九州大学大学院 システム情報科学研究院,
Kyushu University, Faculty of Information Science and Electrical Engineering

土木建設業では団塊世代の熟練技術者の定年退職や少子高齢化による人材不足が深刻化している。これらの課題に対し、我々は土木現場向け Cyber Physical System (CPS) プラットフォーム ROS2-TMS for Construction を開発してきた。本稿では新たに実施した2つの実験に触れつつ、これまでの研究開発を総括する。

Key Words : 自律化施工, 自動施工技術基盤 OPERA, デジタルツイン, i-Construction2.0

1. はじめに

土木建設業では、熟練技術者の退職や新規就業者の減少から人材不足が深刻化しつつある。一方で、土木産業に対するニーズは高く、将来的な需要を満たすため自律化施工技術の開発が急がれている。これらの課題に対し、我々は土木現場向け Cyber Physical System (CPS) プラットフォーム ROS2-TMS for Construction を開発している。

ここで、ROS2-TMS for Construction のこれまでの開発経緯を紹介する。ROS2-TMS for Construction 開発の第1⁽¹⁾・2報⁽²⁾では地形情報や建設機械の位置姿勢、含水率等の地盤情報をVR空間上で可視化するシステムを紹介した。続く第3報⁽³⁾ではタスク管理機構と呼ばれる、Behavior Tree を使用して建設機械を自律操作する機能を紹介した。さらに、第4⁽⁴⁾・6⁽⁵⁾報では自動施工技術基盤 OPERA (以降、OPERA と呼ぶ)の一部としてバックホウ ZX200 のマニピュレーション機能及びクロ

ーラダンプ IC120 のナビゲーション機能を実装するとともに、タスク管理機構と連携し、Behavior Tree からこれらの建機を操作できるようにした。さらに続く第7報⁽⁶⁾ではこれらの2台の建設機械を連携させ、シールドトンネルにおける土砂の搬出作業を想定した自律化施工実験を行った。さらに第9報⁽⁷⁾ではバックホウを実際の工事現場に導入し、試験運用した。また、第5⁽⁸⁾・8⁽⁹⁾報では、OPERA の公式シミュレータ OperaSim をベースに第1・2報で紹介したVRシステムを改良し、新たな可視化システム OperaSimVR を開発した。OperaSimVR には建設機械の可視化機能に加え、建設機械の遠隔操縦機能や、Previewed Reality⁽⁹⁾等の安全機構が備えられている。本稿では OPERA を含めた ROS2-TMS for Construction のこれまでの開発を総括したうえで、これまでに実施した自律化施工実験2例について紹介する。

2. 自動施工技術基盤 OPERA

2.1 開発経緯

共通制御信号とは、建設機械の自律制御に用いる信号の公開規格案を指す。従来の自律化施工システムでは Fig. 1 左図に示すように、施工会社と建設機械メーカーが秘密保持契約 (NDA) を結んだ上で開発が進められてきた。一方で、このような開発では以下の問題が生じる。

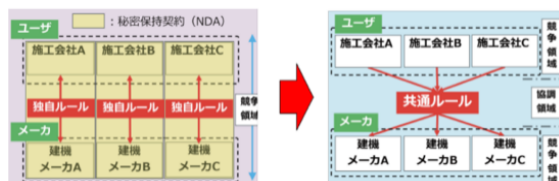


Fig.1 Image of Autonomous System

- 再利用性の問題
自律化施工システムの制御信号が特定のメーカー製造の建設機械に依存してしまうため、同型の建機であってもメーカーが異なれば操作できない。
- 重複開発問題
自律化施工システムは NDA のもと開発が進められているため、グループ間の協力が乏しく、開発投資が重複している。

そこで、土木研究所では自律化施工に用いる制御信号の公開規格化に向け「共通制御信号」を提案した。共通制御信号には建設機械の自律制御に必要なとなる信号案がまとめられている。本信号案が公開規格化され、これに準拠した自律化施工システムを実装することで、Fig. 1 右図に示すように、異なるメーカーの建機を操作することや、メーカーと NDA を結ぶことなく共通制御信号案に基づいた自律化施工技術を実装することが可能となり、Table 1 に示す問題を解決できる。

一方で、共通制御信号自体は単なる信号案であり、これのみでは自律化施工を行うことはできない。自律化施工の実現のためには共通制御信号に対応した建設機械とそれを動作させるフィールドが必要となる。従来、これらの用意・維持管理に多額の費用・手間が必要となることが、中小企業や大学等が同分野へ参入する際の障壁となっていた。そこで、土木研究所は共通制御信号対応の建設機械とフィールドを含む自律施工技術基盤 OPERA

を構築した。OPERA は建設機械の自動化に向けたオープンプラットフォームであり、建設機械の自律運転に必要なとなる汎用機能も提供することで、同分野への参入障壁の低減を図るとともに、制御信号以外の部分における協調領域および競争領域を明確化することを目指している。

2.2 概要

OPERA には Fig. 2 に示すように共通制御信号に対応した建設機械の実機やシミュレータからこれらの建設機械を操作するためのアプリケーションまでが実装されている。これらの機能は ROS2 上で開発され、公開されている^{(10) (11) (12) (13)}。OPERA に用意されている建設機械の一覧を Fig. 3 に示す。



Fig.2 Architecture of OPERA



Fig.3 OPERA-Compatible Construction Machinery

また、OPERA に用意された実機及びシミュレータ (OperaSim-PhysX⁽¹⁴⁾, OperaSim-AGX⁽¹⁵⁾) 上の建設機械は Table 1 に示すとおりである。

Table 1 List of OPERA-compatible machinery

機体名	実機	OperaSim-PhysX	OperaSim-AGX
IC120 (ダンプ)	○	○	○
MST110CR (ダンプ)	○	×	×
ZX120 (バックホウ)	○	○	○
ZX200 (バックホウ)	○	○	○
D37PXI (ブルドーザ)	○	×	○
BW212 (転圧ローラ)	○	×	×
C30R (ダンプ)	○	○	×

なお、シミュレータ上の建設機械と実機は共通の ROS2 信号で操作することが可能な仕様となっている。これらの建設機械の操作用のアプリケーション機能は Table 2 に示す通りである。

Table 2 Application Overview (Red: New)

機体名	ナビゲーション	マニピュレーション	その他
IC120	○ (ic120_ros2)	×	ベッセル開閉
MST110CR	○ (mst110cr_ros2)	×	ベッセル開閉, 上体旋回
ZX120	×	○ (zx120_ros2)	
ZX200	○ (zx200_ros2)	○ (zx200_ros2)	
D37PXI	○ (d37pxi_ros2)	×	
BW212	×	×	
C30R	×	×	

2.3 ナビゲーション機構

今回,新たに Table 3 に示す MST110CR 及び ZX200 のナビゲーション機能の開発を行なった.これまでのナビゲーション機構⁽⁵⁾では Local planner に DWB⁽¹⁶⁾, planner に NavFn⁽¹⁶⁾を使用していたものの,建機の自律移動時には慣性や無駄時間が存在し,グローバルパスを忠実に追従しようとする余りジグザグな経路が生成され易く,ナビゲーション時に建設機械が左右に振ってしまう現象が確認された.このため,新たに Planner に Theta*⁽¹⁶⁾を採用し,直線的な経路を生成した.また,Navigation 2⁽¹⁶⁾の Behavior Tree を独自に改変し,目標位置が一定の閾値[m]内以上で Regulated Pure Pursuit⁽¹⁷⁾を,それ以下で DWB を選択するようにした.これにより,目標位置から遠いエリアではより直線的に,目標位置付近ではよりグローバルパスに忠実に従って動作する,建設機械のような慣性や無駄時間が大きいシステムに適したナビゲーションを実現した.

3. ROS2-TMS for Construction

3.1 開発経緯

自律化施工基盤 OPERA には多様なアプリケーション機能が実装されている一方で,これだけで自律化施工を実現することはできない.自律化施工を実現するためには,作業の段取りをもとに,現場の状況を把握しつつ,状況に応じた制御信号を建設機械へ送るタスクスケジューリング機能が必要となる.そこで,ROS2-TMS for Construction は,OPERA と連携可能して建設機械を制御可能なタスクスケジューラを実装することで,自律化施工を実現した.本システムは,我々がこれまで開発を進めてきた屋内向けサービスロボット向け環境情報構造化フレームワーク ROS2-TMS⁽¹⁸⁾を土工環境に拡張したものであり,ROS2-TMS for Construction のすべてのソースコードは ROS2-TMS 同様に GitHub 上で公開されている.本システムの利用を通じて,従来,掘削や運搬など細かな作業に焦点を当て研究開発が進められてきた自律化施工技術が,さらに大域的な作業の段取りまでを含めた研究開発に移行し,より技術開発が活発化することを期待する.

3.2 概要

ROS2-TMS for Construction の概要を Fig. 4 に示す.

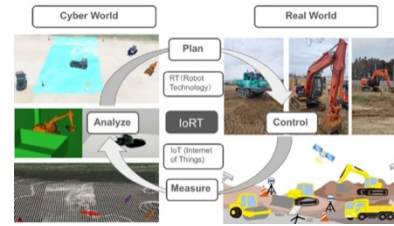


Fig.4 Overview of ROS2-TMS for Construction

Fig. 4 では CPS に則して以下のとおり動作する.

1. 土工現場に配置されたセンサ(環境配置型センサ)や,建設機械に取り付けたセンサから情報を収集する (Measure)
2. 収集したセンサデータをもとにサイバー空間上にリアルタイムな工事現場を構築し,現場の状態を分析した上で,建設機械が次にとるべき動作を計画する (Analyze, Plan)
3. 計画動作を実現するための制御信号を計算し,これを建設機械へと入力する (Control)

上記の機能の実現に向け,ROS2-TMS for Construction は現在,タスク管理機構及び OperaSimVR という 2 つの機能に分けて開発が進められている.各々の機能はモジュール化され,独立動作可能であり,ユーザは必要な機能のみを選んで使用することができる.各々の機能の概要を 3.3 章及び 3.4 章に示す.

3.3 タスク管理機構

OPERA と連携しつつ Behavior Tree を使用して建設機械を操作する機能である.本機能ではデータベースに格納したタスクデータ・静的パラメータデータ・動的パラメータデータという以下の 3 種類のデータをもとに建設機械を操作する.

- **タスクデータ**: 施工シナリオに沿った建設機械の一連の動作データ
- **静的パラメータデータ**: タスク開始時に読み出される,タスクデータの一部を補完するデータ
- **動的パラメータデータ**: タスク実行中に読み出される,タスクデータの一部を補完するデータ

タスク管理機構が上記 3 種類のデータを使用して,建設機械を動作する流れを Fig. 5 に示す.

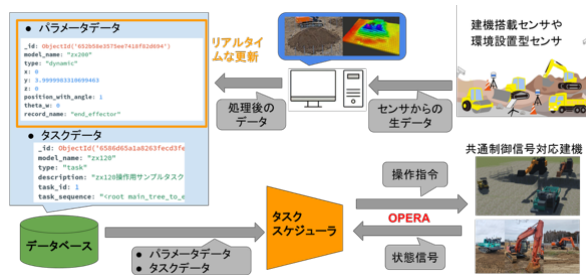


Fig.5 The flow of the task management mechanism

Fig. 5 では、タスク管理機構が建設機械に取り付けたセンサ及び環境設置型センサの2種類のデータをもとに自律化施工を行う流れが示されている。まず、自律操作対象となる建設機械に取り付けたセンサからの情報をもとに、建設機械を操作する流れを以下に示す。

1. タスク管理機構はユーザからの実行開始指令を受け取ると、施工の実行に必要なタスクデータ及びパラメータデータをデータベースから読み出し、タスクスケジューラに読み込ませる。
2. タスクスケジューラは読み出したタスクデータの一部をパラメータデータの値で補完しつつ、施工シナリオを読み込み、これを達成するための操作指令を建設機械へと送る。
3. 建設機械は受け取った操作指令に基づいて動作し、状態信号（受け取った指令の実行状況）をタスクスケジューラへと返却する。

上記の通り建設機械を操作可能な一方で、建設機械自体に取り付けられたセンサからの情報は限られる。そこで、環境設置型センサからの情報もタスク実行時に加味する仕組みを構築した。その流れを以下に示す。

1. 環境側に配置したセンサからの値をもとに、データベース上の動的パラメータの値を書き換える。
2. 動的パラメータを読み出し、前述の2と同様に動作を生成して建設機械へ動作指令を送る。
3. 前述の3の流れに従って、Behavior Treeは受け取ったタスクを実行する。

このようにして、タスク管理機構は自律化施工を行う。なお、タスク管理機構のタスクスケジューラとして採用しているBehavior Treeでは、Fig. 6に示すとおり木構造状にノードをつなぎ合わせることでタスクデータ（施工シナリオ）を構築する。

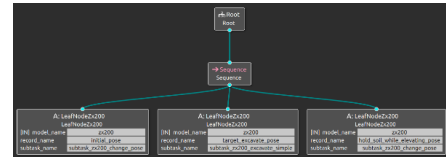


Fig.6 Task used in Behavior Tree

Fig. 6の末端に位置するノードがActionノードと呼ばれるノードであり、建設機械操作のノードがここに含まれる。また、それ以外のノードはActionノードの実行順序を決定するノードとなっている。現在は実装可能な施工の幅を広げることを目的とし、建設機械操作のノードの拡充を進めている。現在までに用意した建設機械操作のノードの詳細をTable 3に示す。

Table 3 Nodes for controlling construction machinery using Behavior Tree (Red: New)

機体名	ノード概要	対応状況 (OperaSim)	対応状況 (実機)
D120	ナビゲーション用ノード群	○(対応)	○(対応)
	ベッセル開閉用ノード	×(非対応)	○(対応)
M ST110CR	ナビゲーション用ノード群	×(非対応)	○(対応)
	ベッセル開閉用ノード	×(非対応)	○(対応)
ZX200	ナビゲーション用ノード群	○(対応)	○(対応)
	ベッセル開閉用ノード	○(対応)	○(対応)
D37PX1	ナビゲーション用ノード群	○(対応)	○(対応)
	ベッセル開閉用ノード	○(対応)	○(対応)
M ST2200VDR	ナビゲーション用ノード群	○(対応)	○(対応)
	ベッセル開閉用ノード	○(対応)	○(対応)

ROS2-TMS for ConstructionのユーザはTable 4に示すノードをFig. 6に示すとおりビジュアルプログラミング形式で木構造状に接続することでタスクデータを構築することができる。また、実装したタスクはOPERAのシミュレータ上及び共通制御信号対応建設機械の実機を動作させることが可能である。さらに、本システムにはタスクの実行状況を可視化する機能が用意されており、作成したタスクの状況を追跡することでタスク上の不備を容易に見つけることが可能となっている。このようにタスクの作成・改変や実行状況のモニタリングを容易に実施可能なため、実機実証実験前にシミュレータを使用して動作検証を行うことで効率的かつ安全な施工の実装が可能となっている。

3.4 OperaSimVR

OperaSimVRとは、工事現場を可視化する機能である。国交省主導のi-Construction2.0では建設現場のデジタル化・見える化を推進しており、ROS2-TMS for Constructionではこの方針に基づいて可視化機能が設計、実装されている。この段階的な実現に向けて構築した機能がOperaSimVRである。本機能ではFig. 7に示すとおりリアルタイムな工事現場をサイバー空間上

で可視化できる。この機能により、管理者はカメラや目視で様子の確認ができない遠隔地や夜間、霧等の視界不良でも建設現場の全体像を把握することが可能となる。

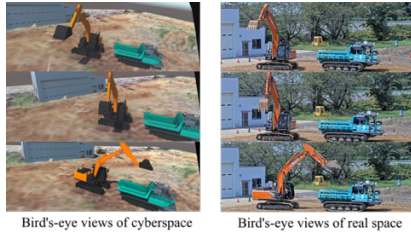


Fig.7 Construction Site Visualized with OperaSimVR

また, Fig. 8 に示すとおりサイバー空間上で立ち入り禁止エリアを設定することもできる。本機能により、もし建設機械が立ち入り禁止エリアに侵入した場合には、即座にタスク管理機構に緊急停止指令を送り、建設機械の動作を停止させることが可能となっている。



Fig.8 Restricted Area Defined in Cyberspace

4. 適用事例

本章では新たに実施した実証試験 2 例について紹介する。これらの実験は OPERA 及び ROS2-TMS for Construction の実現場適用に向けた安定性を検証するとともに、バックホウ ZX200 やダンプ IC120 のナビゲーション機能の動作検証を目的として実施した。

4.1 バックホウによる掘削・放土動作の現場実証

実際の土砂改良現場にて、バックホウによる土山からの土砂の掘削及びホッパーへの投入動作の自律化実験を行った。現場の全体像を Fig. 9 に示す。



Fig. 9 Overview of the First On-Site Application Experiment

実験では、バックホウ ZX200 が土取場から土砂を掘削し、粘性土投入口に投入する動作を行った。なお、土取

場の土砂は状況に応じて有人操縦のダンプカーにより補填し、土砂が不足ない状態を保ちつつ、時々の土砂形状に応じて最適な掘削位置をセンシングしながら実験を行った。実験の様子を Fig. 10 に示す。



Fig.10 Part of the First On-Site Application Experiment

本実験は OPERA 及び ROS2-TMS for Construction の初の現場適用事例であるとともに、1 時間以上の安定した動作が可能であることを実証した。詳しくは文献⁽⁹⁾を参照されたい。

4.2 バックホウ ZX200 及びクローラダンプ IC120 による土山掘削及びダンプへの積載・運搬・放土実験

土木研究所の実験フィールドにて、土山からの土砂の掘削・積載・運搬・放土実験を行った。実験場の全体像を Fig. 12 に示す。

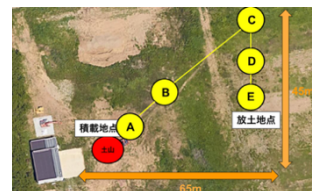


Fig.11 Overview of Experimental Field

実験ではバックホウ ZX200 を土山隣に配置し、そこから取得した土砂をクローラダンプ IC120 に積載し、放土地点まで運搬(A→B→C→D→E)・放土し、再度放土地点から積載地点まで戻ってくる(E→D→C→B→A)動作を土山の土砂がなくなるまで繰り返した。その様子を Fig. 12 に示す。



Fig. 12 Excavation, Transport, and Dumping Experiment

本実験ではROS2-TMS for Constructionが複数台建設機械による自律化施工を行う能力を有していることを検証した。詳しくは文献⁽⁷⁾を参照されたい。

5. まとめ

今回, ROS2-TMS for Constructionの開発背景と現在の開発状況について説明した。今後は以下の開発方針に沿ってさらなる機能拡充を進める。

● BIM/CIM との連携

現在のROS2-TMS for Constructionではユーザ自身が手作業でタスクを実装する必要があり, 施工が複雑化するにつれて実装の難易度が上がっていく。実際の現場への導入を考えた際には, より簡単にタスクを実装可能な入力インタフェースを用意する必要がある。このような背景を踏まえ, 我々は情報流通 IF と呼ばれるBIM/CIM ベースの入力インタフェースの実装を進めている。今後は情報流通 I/F を介した自律化施工の実証実験を進めていくことを予定している。

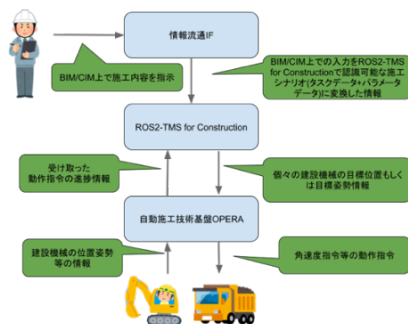


Fig. 15 Overview of Autonomous Construction Including the Information Exchange Interface

● 実装可能な施工の拡充

今後, OPERA 対応建機の転圧ローラ BW212 の自動化を含め, ROS2-TMS for Construction から操作可能な建設機械及び機能を拡充し, 実装可能な施工の幅を広げていく予定である。

謝辞

本研究の一部は, 内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人: 土木研究所) 及び JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2136 の支援を受け実施されました。

参考文献

(1) 前田龍一ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2023

(2) 前田龍一ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発-第2報 360 度カメラ映像を用いた CPS 可視化実験-”, 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, 2023

(3) 笠原侑一郎ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第3報 自律施工技術基盤 OPERA との連携-”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2024

(4) 柴田航志ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第4報 自律施工技術基盤 OPERA との連携-”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2024

(5) 笠原侑一郎ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第6報 自律施工技術基盤 OPERA との連携によるクローラダンプの制御-”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2025

(6) 笠原 侑一郎ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第7報 バックホウ・クローラダンプと複数 3D LiDAR による土砂の掘削・積載・運搬・放土作業の自動化-”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2025

(7) 高野智也ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第9報 土砂改良作業への適用事例-”, 建設ロボットシンポジウム, 2025

(8) 秋成光太ほか, “土工現場 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第5報 没入感 VR インターフェース OperaSimVR の開発-”, 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, 2024.

(9) 秋成光太ほか, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第8報 没入感 VR インターフェース OperaSimVR を用いた Previewed Reality 実験-”, ロボティクスメカトロニクス講演会, 2025.

(10) GitHub: ic120_ros2, https://github.com/pwri-opera/ic120_ros2 (アクセス日 2025/8/9)

(11) GitHub: zx200_ros2, https://github.com/pwri-opera/zx200_ros2 (アクセス日 2025/8/9)

(12) GitHub: mst110cr_ros2, https://github.com/pwri-opera/mst110cr_ros2 (アクセス日 2025/8/9)

(13) GitHub: d37pxi_ros2, https://github.com/pwri-opera/d37pxi_ros2 (アクセス日 2025/8/9)

(14) GitHub: OperaSim-PhysX, <https://github.com/pwri-opera/OperaSim-PhysX> (アクセス日 2025/8/9)

(15) GitHub: OperaSim-AGX, <https://github.com/pwri-opera/OperaSim-AGX>, (アクセス日 2025/8/9)

(16) Steve Macenski et.al, “The Marathon2: A Navigation System,” IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020

(17) Steve Macenski et.al, “Regulated pure pursuit for robot path tracking”, Autonomous Robotics, 2023

(18) Tomoya Itsuka et.al, “Development of ROS2-TMS: New Software Platform for Informationally Structured Environment”, ROBOMECH Journal, 2022