

土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発

ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites

○学 前田 龍一 (九州大学) 正 井塚 智也 (九州大学)
正 倉爪 亮 (九州大学)

Ryuichi MAEDA, Kyushu University, maeda@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Tomoya ITSUKA, Kyushu University, itsuka@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Ryo KURAZUME, Kyushu University, kurazume@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

The civil engineering and construction industry has seen an increase in occupational accidents in recent years. Although several systems to improve the efficiency of earthwork operations have been developed, they have not directly involved in improving safety. The objective of this study is to explore the use of a cyber-physical system (CPS) to improve both the efficiency and safety of earthwork operations. The CPS platform should have a function to store and manage environmental information in a database. The ROS2-TMS, which is the CPS platform for service robots, satisfies this requirement. However, the ROS2-TMS cannot handle environmental information specific to earthwork sites, such as terrain and ground data. Therefore, in this research, we developed an improved version of ROS2-TMS named ROS2-TMS for Construction that can store and manage site-specific environmental information in a database. Additionally, we developed a VR interface to visualize the stored environmental information.

Key Words: Construction Robot, VR, ROS2, Cyber-Physical System

1 緒言

長年、労働災害を防止する様々な取り組みにより、長期的には労働災害の被災者数は減少しているものの、令和3年の休業4日以上の死傷者数は、平成10年以降で過去最多を記録した[1]。特に土木建設業における死亡者数は、全業種内で最大の約33%を記録[2]し、より一層の改善が求められている。一方、土工作業の効率化についてはIT技術を活用した施工管理システムが開発されている[3]ものの、安全性の向上に直接的に寄与するまでには至っていない。

そこで本研究では、土工作業の効率化と安全性向上を同時に実現するシステムとして、土工現場へのサイバーフィジカルシステム(CPS)の導入について検討する。CPSとは、物理世界とサイバー空間が相互に連動し、動作するように構成されたシステムのことである。

土工現場用のCPSには、実世界の土工現場に設置されたセンサから収集された環境情報をデータベースに保存し、必要に応じてその蓄積された環境情報をサイバー空間や実空間の土工現場に提供する機能を持ったシステムが必要となる。本要件を満たすシステムとして、これまでにサービスロボット用CPSプラットフォームROS2-TMS[4]が井塚らによって開発されている。このシステムは、屋内環境に分散配置された様々なセンサから収集された環境情報を蓄積・分析することで、ユーザからの要求に基づいたロボットの動作計画や制御などを実現する。しかし、ROS2-TMSは屋内環境でのロボットサービスを想定したシステムのため、地形情報や地盤情報などの土工現場特有の情報を扱うことや、建設機械の制御は困難である。

そこで本研究では、土工現場用に改良したROS2-TMSとして、新たに土工現場特有の環境情報のデータベースへの保存・管理が可能なROS2-TMS for Constructionを開発した。また、本システムの利用例の1つとして、データベースに蓄えられた環境情報をVRを用いて可視化するインタフェースも開発した。本稿では、これら開発したシステムについて述べた後、各システムに対して行った動作確認実験について報告する。

2 ROS2-TMS for Construction

2.1 アーキテクチャ

図1にROS2-TMS for Constructionのアーキテクチャ図を示す。以降、各モジュールについて説明する。

- Database (TMS_DB)

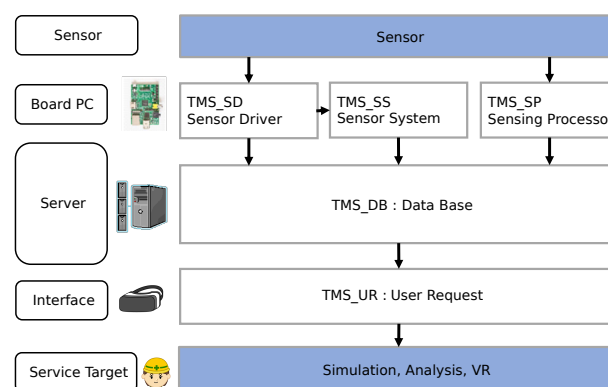


Fig.1: ROS2-TMS for Construction architecture

データベースへの環境情報の保存と、保存された環境情報の取得を行う。データベースには MongoDB を用いる。

- User Request (TMS_UR)
TMS_DB を用いてデータベースから取得された環境情報を利用者または利用システムに提供する。
- Sensor Driver (TMS_SD)
土工現場に設置したセンサから収集された環境情報を取得後、各環境情報に合わせて処理を行う。TMS_SD モジュール群では、地盤情報と地形情報を扱う。
- Sensor System (TMS_SS)
センサデータを解釈し、より高次の環境情報へ変換を行い、TMS_DB を用いて保存する。本研究では、TMS_SD から送られてきた静的地形点群をメッシュや高さ地図へ変換する処理などを行う。
- Sensing Processor (TMS_SP)
センサから収集された環境情報を用いた適切な処理を行い、TMS_DB を用いて保存する。本研究では、センサから得た点群を用いた建設機械の位置・姿勢推定処理などを行う。TMS_SS のように TMS_SD から送られてきた環境情報を扱うのではなく、センサから直接データを受け取って処理する必要のある環境情報が TMS_SP 内で扱われる。

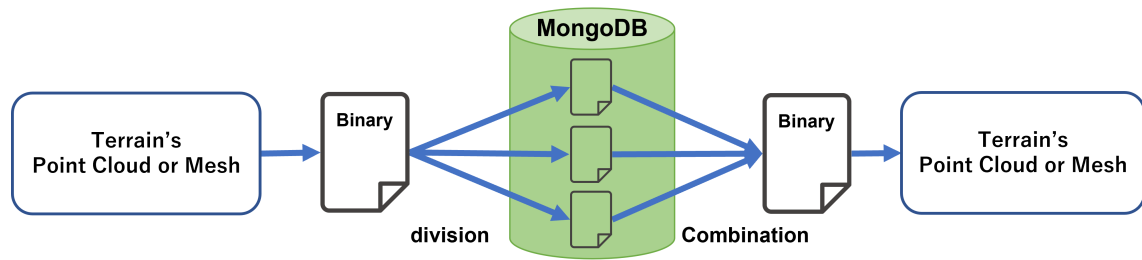


Fig.2: Work flow of GridFS

2.2 環境情報の保存

本システムでは現在、以下 3 種類の環境情報を扱える。

1. 地形情報（静的・動的）
2. 建設機械の位置・姿勢情報
3. 地盤情報

以降、各環境情報の処理・保存方法について説明する。

2.2.1 地形情報

土工作业をするうえで地形情報は必要不可欠なため、地形情報を扱えるようにすることは非常に重要である。しかし、地形情報は、場合によっては 100MB を超えるほど容量が大きいため、そのまま扱うと処理負荷が非常に大きい。そこで負荷削減のため、地形情報を静的なものとの動的なものに分割し、それぞれ異なる方法で処理した。

● 静的地形情報

静的地形情報とは、土工作业中に変化しない地形を指す。例えば、土工作业の対象となっていない地面や草木などがそれにあたる。ドローンなどを用いて、土工作业前の取得を想定する。

本システムには 3 次元点群として入力され、保存する際には、TMS_SS で点群からメッシュの生成も行い、データベースには点群とメッシュ両方の保存を行う。

● 動的地形情報

動的地形情報とは、土工作业中に変化する地形を指す。例えば、バックホウを使う現場であれば、バックホウの掘削対象の土がそれにあたる。

静的地形情報と比べると、対象となる地形の範囲が狭い分容量も小さいが、土工作业中に常に取得する必要がある。3D LiDAR などを用いての取得を想定しており、データベースには 3 次元点群として保存される。

地形情報は他の環境情報と比べて非常に容量が大きいため、MongoDB の GridFS という機能を用いる。GridFS とは、容量の大きなバイナリデータを複数のバイナリデータに分割することで、容量の大きなバイナリデータでも保存を可能とする機能である（図 2）。

2.2.2 建設機械の位置・姿勢情報

建設機械を用いて土工作业を行う場合がほとんどのため、作業員の安全性を確保する上で、建設機械の位置・姿勢を把握しておくことは重要である。本システムでは、土工現場に複数設置された 3D LiDAR から収集された 3 次元点群情報をもとに、TMS_SP にて建設機械の位置・姿勢推定を行い、得られた推定位置・姿勢情報を保存する。

現在、建設機械の 3 次元位置・姿勢推定には、稲川らが提案した 3D LiDAR による 3 次元位置推定手法 [5] を用いている（図 3）。本手法では、まず初めに、3D LiDAR から得られた点群に対してユークリッドクラスター抽出法を用いて、対象物の探索点群の抽出を行う。次に、探索点群と既知のテンプレート 3D モデルから Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを用いて、対象物かどうかの判定と建設機械の位置・姿勢推定を行う。

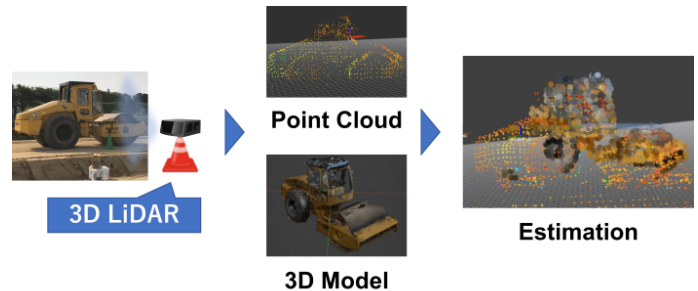


Fig.3: 3D position estimation

2.2.3 地盤情報

地盤情報とは、土工現場の地盤の固さや、含水率などといった地盤に関する情報のことを示す。地盤が軟らかい場合、建設機械の操縦は不安定となり、危険性が高まるため、土作業の安全性を確保する上で地盤情報も非常に重要である。本システムでは地盤情報を 2 次元情報として扱っており、データベースにも 2 次元情報として保存される。

2.3 蓄積された環境情報の取得

本システムでは TMS_DB と TMS_UR モジュール群を用いて、データベースに蓄えられた以下の環境情報を取得する。

- 静的地形点群・メッシュ
- 動的地形点群
- 建設機械の位置・姿勢
- 地盤に関する 2 次元情報

また、本システムでは環境情報を取得するパターンとして、以下 2 つを想定する。TMS_UR モジュール群を立ち上げる際のパラメータ指定によって、この 2 パターンを簡単に使い分けられるよう設計した。

- 過去に蓄積された環境情報の取得
- 現在計測され、逐次的に保存されている環境情報の取得

上述した方法で取得された環境情報は、土作業のシミュレーションや分析、また、3 章で紹介する VR での活用などが考えられる。

3 VR による可視化インタフェース

ROS2-TMS for Construction の利用例の 1 つとして、VR による可視化インタフェースを開発した。本インタフェースにより、データベースに蓄えられた環境情報を、没入感を持って確認できる。また、本インタフェースの開発には Unity を用いた。

3.1 各環境情報の表示方法

ROS2-TMS for Construction の TMS_UR モジュール群から以下の環境情報を受け取り、それぞれに適した処理を行い、VR ゴーグルに表示する。

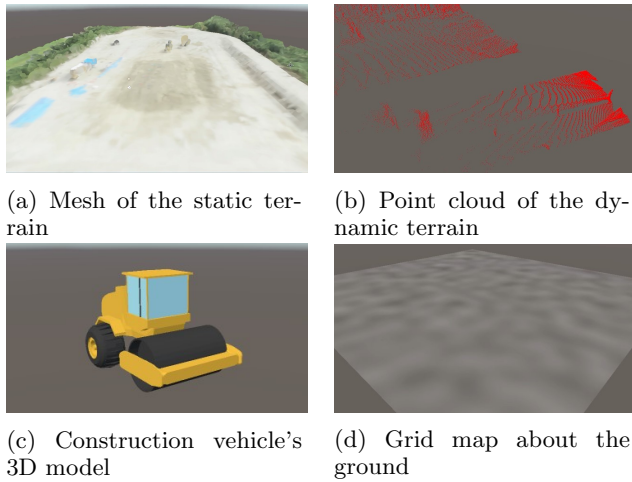


Fig.4: Environmental information displayed in Scene View of Unity

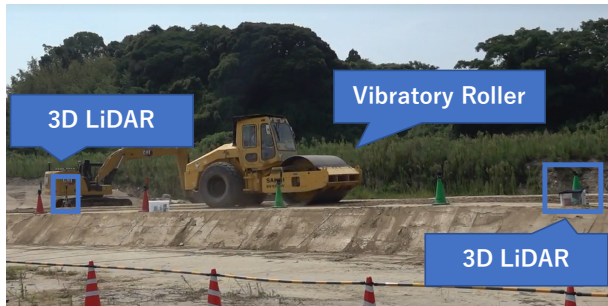


Fig.5: Compaction of embankment by a vibratory roller

- 静的地形メッシュ
VR ゴーグル装着者が現実世界と同様に歩行できるように、メッシュの法線をもとにコライダを設定し、表示する。
- 動的地形点群
得られた各点群を分かりやすくするため赤色で着色し、表示する。
- 建設機械の位置・姿勢
得られた推定位置・姿勢情報をもとに、建設機械の 3D モデルを表示する。
- 地盤
得られた 2 次元情報をもとにグリッドマップを生成し、表示する。

各環境情報を Unity の Scene View 上に実際に表示した様子を図 4 に示す。

4 環境情報の保存確認実験

本実験では、ROS2-TMS for Construction に対して以下の環境情報を入力として扱い、2.2 節で説明したように適切に処理・保存されるかの確認を目的として行った。

1. 建設機械の位置・姿勢推定用点群
九州大学の屋外実験場に行われた、振動ローラーによる盛土の転圧作業時（図 5）に 2 台の 3D LiDAR（Robosense, RS-LiDAR-M1）で取得された点群を用いた。
2. 静的地形 3 次元点群
上記の転圧作業が行われた屋外実験場の上空からのドローンによる撮影で取得した点群を用いた。

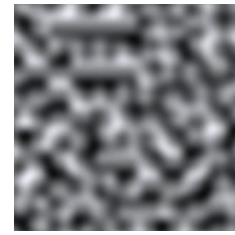


Fig.6: 2D information about the ground

3. 動的地形 3 次元点群

上記の転圧作業時に 1 台の 3D LiDAR（振動ローラーの前側）で取得された点群を用いた。

4. 地盤の固さ、または含水率を示す 2 次元情報

図 6 に示す 2 次元の情報を用いた。

MongoDB に保存されているかの確認は、GUI ツールである MongoDB Compass を用いて行った。保存結果の例として、MongoDB に保存されている静的地形情報を MongoDB Compass によって可視化したものを図 7 に示す。この図より、静的地形情報が複数のバイナリデータに分割され、想定通り保存されていることが確認できる。また、他の環境情報についても同様に、適切に処理・保存されていることを確認した。

5 蓄積された環境情報の取得・VR 表示確認実験

本実験では、4 章にて保存された環境情報を取得して VR 表示させることにより、ROS2-TMS for Construction における蓄積された環境情報の取得と、VR による可視化インタフェースの動作確認を行った。VR ゴーグルには Meta Quest Pro（図 8）を用いた。

VR に表示された様子を図 9 に示す。実験の結果、システムの基本的な動作は正常に行えていることを確認できた。しかし、以下 2 つの課題が判明した。

1. 地盤情報の表示の分かりづらさ

静的地形メッシュ情報との重なりにより、地盤情報が非常に分かりづらいことが判明した。今後は、静的地形情報と掛け合わせて、地盤情報を単純な 2 次元情報ではない形への変換が求められる。

2. 動的地形情報の遅延

2.2.1 節で述べたように、動的地形情報を保存する際に GridFS を用いている。GridFS を用いて保存するためには、バイナリデータである必要があるため、ROS2-TMS for Construction 内で動的地形 3 次元点群とバイナリ間の変換処理が行われている。この変換処理に時間がかかっていることで遅延が生じている。

今後は、動的地形情報については MongoDB 以外の保存場所の検討、もしくはリアルタイム性が重要視される場面に限り、センサから得られた情報を直接 TMS_UR で取得するといった対策が求められる。

6 結言

本研究では、土工現場用サイバーフィジカルシステムプラットフォーム ROS2-TMS for Construction を開発し、ROS2-TMS では扱うことができなかった地形情報や地盤情報といった土工現場特有の環境情報が扱えることを実験により確認した。

また、ROS2-TMS for Construction によってデータベースに蓄えられた環境情報の VR による可視化インタフェースを開発し、データベース内の環境情報を没入感を持って確認できるようにした。

今後は、実験により判明した課題を対処しつつ、以下に取り組む予定である。

● 各環境情報間の連携

現在、各環境情報は独立したものとして扱っているため、位置や時刻合わせを可能にする。

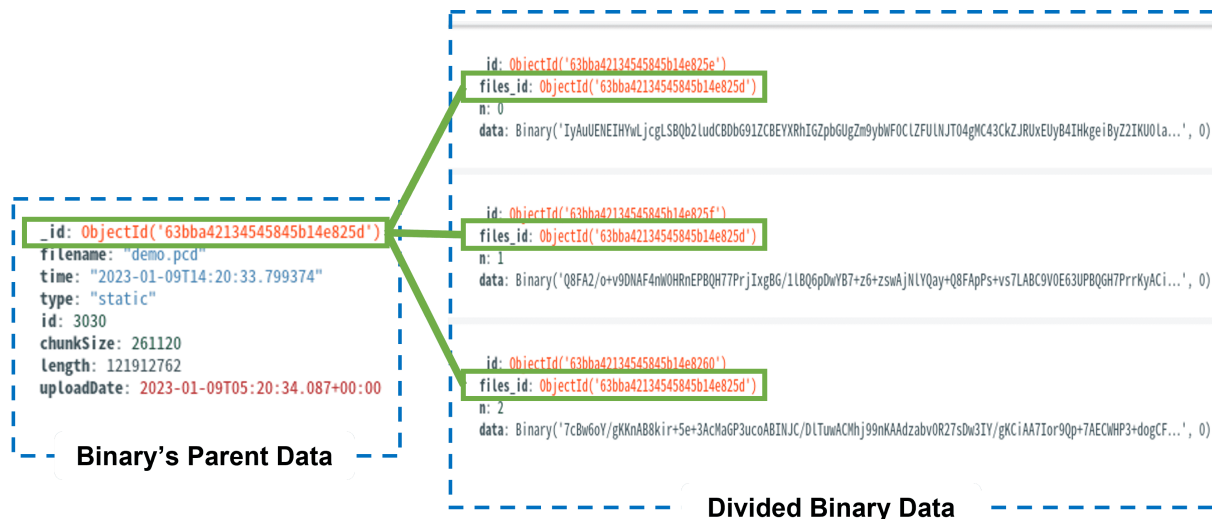


Fig.7: Static terrain stored in MongoDB



Fig.8: Meta Quest Pro

- ROS2-TMS にて実装されていたタスク計画 (TMS_TS) モジュールの実装

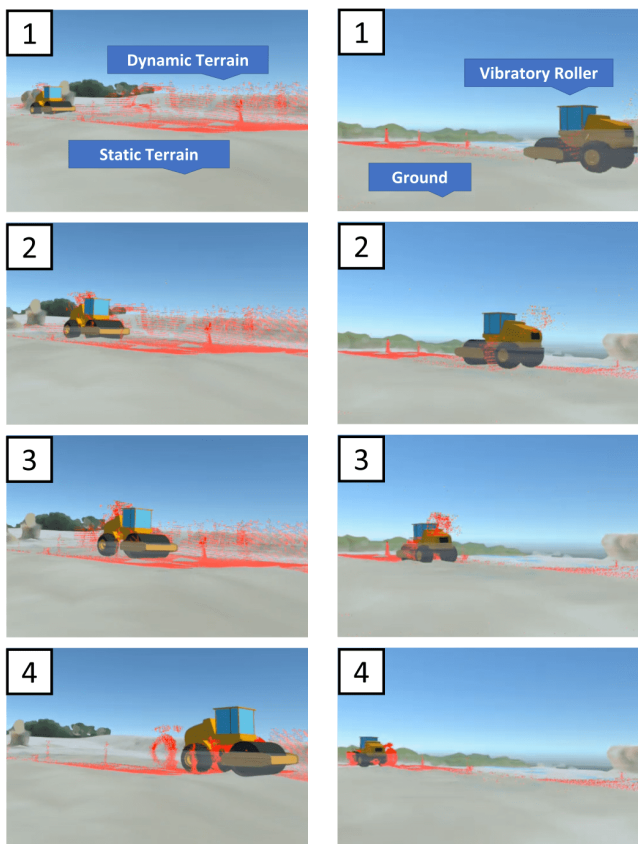
TMS-*TS* モジュールを開発し、ユーザからの指令（タスク）をサブタスクに分割し、1つ1つのサブタスクを順次実行していくことで、ユーザの指令遂行を実現する。本研究にて開発した機能と組み合わせることにより、サイバー空間からの建設機械の操縦を目指す。

謝辭

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。また、建設機械の位置・姿勢推定については、弘前大学の竹岡年延助教から実装プログラムを提供していただきました。

参考文献

- [1] 令和 3 年 労働災害発生状況 | 厚生労働省, <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei11/rousai-hassei/dl/b21-16.pdf> (アクセス日 2023/3/17).
- [2] 労働災害発生状況の分析等 | 厚生労働省, <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei11/rousai-hassei/dl/s21-16.pdf> (アクセス日 2023/3/17).
- [3] デキスパート (基本部) | KENTEM [株式会社建設システム], <https://www.kentem.jp/product-service/dekispart/> (アクセス日 2023/3/17).
- [4] Tomoya Itsuka and Minsoo Song and Akihiro Kawamura and Ryo Kurazume, “Development of ROS2-TMS: New Software Platform for Informationally Structured Environment”, *Robomech*, Vol. 9, No. 1, 2022.
- [5] 稲川 正浩, 川辺 知人, 竹岡 年延, 永谷 圭司, “環境設置 LiDAR を用いた建設機械の 3 次元位置推定手法”, 第 22 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論文集 (2021), pp. 3517–3521.



(a) Viewpoint 1 (b) Viewpoint 2

Fig.9: Environmental information displayed in VR