



テムが醸成されている既存のものを積極的に流用することとした。

上記の目標・方針に加え、シミュレータが具備すべき技術的要件を検討し、以下の5項目を抽出した。

- ①ROSや他のミドルウェアと親和性がある
- ②計算結果を3次元で視覚的に表示できる
- ③物理演算に基づいた建設機械の挙動を扱える
- ④建設機械との相互作用による地形変形を扱える
- ⑤リアルタイム以上の速度で演算・描画ができる

必要と思われるいくつかの項目について補足する。まず①について、OPERAが提供する自律施工用のアプリケーションについては、ミドルウェアとしてROS (Robot Operating System) <sup>3)</sup>またはその後継であるROS2を採用しており、自律施工用のソフトウェアを開発するユーザについてもミドルウェアとしてROS/ROS2を利用するケースが多数あると考えられるため、ROS/ROS2との親和性は必須である。他方で、利用者が既に利用している他のミドルウェアとの親和性を担保可能であることが望ましい。

続いて④について、建設機械は地面等へ接触することで力を作用し、それによって建設用の土砂を掘削・運搬・敷均し・締固め・整形といった施工をし、目的とする土工建設物を造成する。こういった、建設機械との相互作用によって地面(土砂)がどのように変形・変質するのかを現実合うようシミュレートできることが求められる。

## 2.2 開発プラットフォームの選定

OPERAが採用するミドルウェアのROSと親和性が高く、かつ無償利用が可能な3D物理シミュレータとして、Gazebo<sup>4)</sup>が挙げられる。ROSの利用者であれば、Gazeboについても利用経験がある場合が多く、エコシステムとしても醸成していると言える。

一方で、GazeboはROSとの連携を前提としたアーキテクチャとなっているため、ROS以外の他のミドルウェアとの親和性に乏しい。先述したように、OPERAのシミュレータはROS以外のミドルウェアについても活用可能にすることを目指す方針としているため、Gazebo以外のプラットフォームについても検討することにした。

近年、自動車やロボットを自動化するためのソフトウェア開発用の物理シミュレータのプラットフォームとして、ゲームエンジンを採用する動きが広まっている。従来の専用シミュレータと比較し、以下のような特徴・利点を有していることが主な理由である。

- ・豊富な3D描画機能や物理エンジンを利用可能
- ・コミュニティやサポートが充実している
- ・汎用性および拡張性が高い
- ・開発コストを低減し易い

このようなゲームエンジンとROSを用いたロボットの自動化ソフトウェア開発の事例として、つくばチャレンジ<sup>5)</sup>が挙げられる。元々、つくばチャレンジは茨城県つくば市のロボット特区として定められた実在の場所で、移動ロボットの自律走行技術を向上させるためのロボットチャレンジであるが、コロナ禍となった2020年を契機として、仮想空間の中に模擬したつくば市の中を自律走行させるソフトウェア競技会Virtual Tsukuba Challengeが併催されている。このシミュレータプラットフォームとして採用されているゲームエンジンが、Unity<sup>6)</sup>とUnreal Engine<sup>7)</sup>の2種である。OPERAではこの2種のうち、開発者コミュニティが大きく、かつアセットが充実している(選定を行った2021年3月時点)Unityを採用することとした。これは先述した、利用者が簡単に扱えるようにすることで利用者

表-1.開発プラットフォームの検討結果

シミュレータプラットフォーム(開発元)		Gazebo (Open Robotics)		Unity (Unity Technologies)	
物理エンジン(開発元)		Open Dynamics Engine (Russel Smith)	Bullet Physics (Erwin Coumans)	Nvidia PhysX (Nvidia)	AGX Dynamics (Algorix)
①ミドルウェアとの親和性	ROS	◎	◎	○	○
	ROS以外	×	×	○	○
②3D表示可否		○	○	◎	◎
③建機挙動のシミュレート可否		○	○	○	○
④地形変形のシミュレート可否		△~○ (自作が必要)	△~○ (自作が必要)	△~○ (自作が必要)	◎ (商用ライブラリ有)
⑤リアルタイム性		×	△	○~◎	◎
費用	プラットフォーム	○:無料で利用可		○:無料で利用可 (会社規模に応じ有料)	
	物理エンジン	○:無料で利用可	○:無料で利用可	○:無料で利用可	×:有料
備考			土砂表現に粒子モデルを用いるとリアルタイム性を確保困難	土砂モデルおよび建機と土砂間の相互作用については自作での実装が必要	土砂モデルおよび建機と土砂間の相互作用についても商用利用実績あり
採否		×	×	△~○	△~○

◎:良好 ○:問題なし  
△:懸念あり ×:不相当

数を出来る限り増やす、という方針に則している。

これまでに述べたシミュレータプラットフォームである Gazebo および Unity と、その内部で動作する物理エンジンとの組み合わせをいくつか候補とし、2.1 節に記したシミュレータの要件と照会することで、採否を判断した (表-1)。

まず Gazebo については、物理エンジンに Open Dynamics Engine<sup>8)</sup>と Bullet Physics<sup>9)</sup>を採用することを検討した。Open Dynamics Engine については、地形変形のシミュレートが困難であることが判った。一方、Bullet Physics を用いる場合にはそれが可能であることが予備調査により判ったが、Gazebo のサーバクライアント間の通信仕様に基いて利用すると、リアルタイム動作と地形変形のシミュレーションを両立することが困難であった。前述した通り、Gazebo は ROS 以外のミドルウェアとの親和性がないことも勘案し、OPERA のシミュレータとしては採用しないことを決定した。

続いて Unity については、物理エンジンに Nvidia PhysX<sup>10)</sup>および AGX Dynamics<sup>11)</sup>を採用することを検討した。Nvidia PhysX については、地形変形のシミュレートが可能であることが判ったが、この機能については、この物理エンジンが提供するライブラリ内にはなく、自作する必要があることが判った。一方で、AGX Dynamics にはこの機能を提供するライブラリが豊富に内包されているが、有償ソフトウェアであり利用者がライセンス費用を負担する必要がある。以上を踏まえ、OPERA では、シミュレータプラットフォームに Unity を採用し、物理エンジンについては利用者が求める費用対効果に応じて使い分けられるよう、Nvidia PhysX を用いたもの (以下、PhysX 版) と AGX Dynamics を用いたもの (以下、AGX 版) の 2 種類を提供する方針とした。

### 3. PhysX 版シミュレータ

本章では、PhysX 版のシミュレータについて、建設機械のモデル、土砂のモデル、建設機械と土砂との相互作用に関する技術的な中身について記す。

#### 3.1 建設機械モデル

シミュレータ内で動作する建設機械モデルについては、実際の形状にできるだけ一致させる、かつユーザー側が自由に二次利用できるように公開することを目指した。この要件を満たすには、建設機械メーカーが有する知的財産権を侵害しない必要がある。そこで、以下の手順で建設機械のシミュレーションモデルを作成した (表-2)。

##### [1] 実機外形の 3 次元点群計測

OPERA 対応建機の実機を平地に配置し、外形を 3 次元 LiDAR を用いて点群として取得する。点群の取得には、3 次元 LiDAR に Leica 社の RTC360 又

表-2.建設機械シミュレータモデルの作成手順

建設機械モデルの作成手順	油圧ショベル zx120 (日立建機)	クローラタンクトラック ic120 (加藤製作所)
[1] 保有している実機を 3D LiDARを用いて点群計測		
[2] 点群データから3Dメッシュデータを作成 +リンクパラメータを抽出		
[3] URDFのファイルを作成		
[4] URDFをUnityへインポート +各オブジェクトへコンポーネントを追加・設定		

は同社の BLK2GO を用いた。[2] 3次元メッシュと運動学パラメータの抽出

[1]で取得した点群データを基に、各建機を構成するリンク毎に分解して 3 次元メッシュモデルを作成する。加えて各リンク間を繋ぐ関節や相対位置、および運動学に関するパラメータを抽出する。なお、運動学パラメータについては、上記の点群に加えて、メーカーが一般公開しているユーザー向けのカatalogを主に用いたが、事前に予備調査で実測した値も含む。

##### [3] URDF(Unified Robot Description Format)作成

[2]で作成した 3 次元メッシュモデルや運動学パラメータを基に、URDF 形式で、対象の建機を記述する。なお、本ファイルに含まれている重量等の慣性パラメータについては、実測・同定等ができていないため、誤差の大きい数値が残留している。

##### [4] Unity の各種コンポーネント設定

[3]で作成した URDF ファイルを Unity 内へインポートし、ゲームオブジェクトとして動作させるために必要な各種コンポーネントをアタッチし、適切にパラメータを設定する。PhysX 版では、ArticulationBody コンポーネントを全リンクに用いて、関節タイプや可動域、動力学モデルパラメータといったコンポーネント内パラメータを設定している。またクローラ部については、スプロケットとアイドラの回転中心軸およびその中間点を通る平行な軸の 3 か所に、履帯の左右幅に等しく、かつ上下幅と同じ直径を有する車輪として干渉モデルを設定している。つまり、クローラ走行体部については履帯を厳密にシミュレートするのではなく、スキッドステア型の 6 輪移動体としてモデル化した。

#### 3.2 土砂モデル

Unity には標準機能として、地形を表現するための Terrain オブジェクトがある。OPERA のシミュレータについても、建設機械を運用する地形はこの Terrain をベースとしているが、建設機械の動作に応じて地形の一部が変形したり、あるいは一部が移

動する、といった機能については Unity の標準機能に対して拡張を行った。一般的な水分を含んだ土砂に見られるような、粘性を伴う挙動を模擬可能、かつリアルタイム性を担保するために計算コストを抑えられる手法として、Daniel Holtz らの手法<sup>12)</sup>を参考に実装した。これは個別要素法 (DEM) に基づき、土砂を一定の半径  $R$  (=粒子半径) を持つ粒子群としてモデル化し、隣接する粒子間の距離が一定値  $D$  (=固着力作用距離) 以下の場合には、一定の固着力  $F$  (=粒子間固着力) が作用し、そうでない場合は粒子間力は作用しない、というシンプルなモデルである (図-3)。本シミュレータでは、これらのパラメータはユーザが簡単に調整可能となるよう、GUI を設けている。

る機能については、有効化/無効化を GUI 上で簡単に切り替えられるようにしている。

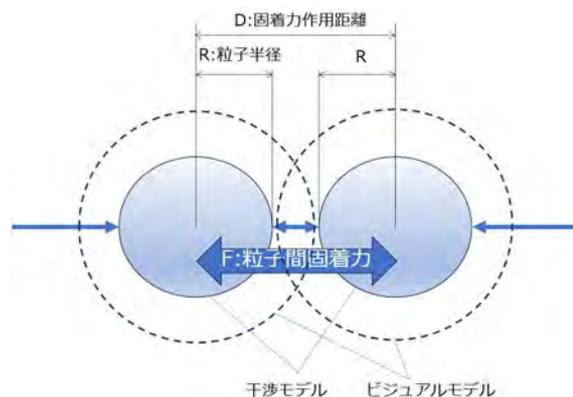


図-3 PhysX 版の土砂粒子間力モデル

### 3.3 建設機械と土砂間の相互作用

PhysX 版においては、建設機械と土砂との接触によって、土砂が崩壊や変形を生じている際に建設機械と土砂との間に相互作用する力を算出する機能は、2023年8月時点で未実装である。油圧ショベルのバケット部を除いた建設機械の部位と、地面 (Terrain) とが接触した場合、剛体同士の接触とみなして動力学計算処理がなされる。一方、バケット部位については、下記の2種類の干渉形状を設定している。

#### ① バケット・Terrain 接触判定用干渉形状

干渉の検出のみを行い、他の物体との間の反力の発生を無効化した干渉形状であり、バケットと地面との接触時に粒子生成イベントを発生させる

#### ② 粒子保持用干渉形状

粒子をバケットの内側に保持するための干渉形状であり、粒子や他の物体との干渉は有効だが、地面 (Terrain) との干渉を無効に設定

バケット・Terrain 接触判定用干渉形状と Terrain が重なった場合は、その重なった部位の体積に相当する高さを、Terrain から差し引き、同時に同等の体積に相当する粒子をバケットの内側に生成する。この粒子は、粒子保持用干渉形状との相互作用を剛体同士の接触として演算する。また、粒子が粒子保持干渉形状から離脱し、Terrain と接触し、停止した場合には、当該の粒子を消滅させ、同時にその消滅した場所における Terrain の高さを、消滅した粒子の体積に相当する分だけ加算する。

以上のように、土砂モデルおよび建設機械と土砂との相互作用については、現実の物理現象の厳密な再現は行わない簡易的な実装となっている (生成された粒子とバケットの粒子保持用干渉形状との相互作用力のみ演算されるが、粒子生成の瞬間にインパルス上の力が作用するため安定しない)。なお、この Terrain の一部を粒子化して、地面変形を模擬す

## 4. AGX Dynamics 版シミュレータ

本章では、AGX 版のシミュレータについて、建設機械のモデル、土砂のモデル、建設機械と土砂との相互作用に関する技術的な内容について記す。なお、紙面の都合上、先述した PhysX 版シミュレータとの差分に絞って記述する。

### 4.1 建設機械モデル

3.1 節に記した PhysX 版シミュレータの建設機械の作成手順[1]~[4]の中で、PhysX 版との差異があるのは[4]のみである。AGX Dynamics の Unity 向けプラグインである AGXUnity<sup>13)</sup>を用いて、各種のコンポーネントをアタッチし、各種のパラメータ設定をしている。PhysX 版では Unity 標準の ArticulationBody を使用したが、AGX 版では RigidBody という AGXUnity が提供するコンポーネントを用いて、関節のタイプや拘束条件、動力学モデルパラメータといった物理特性を設定している。またクローラ部については、AGXUnity が提供する TrackWheel および Track コンポーネントを使ったシミュレーション用の履帯モデルを生成している。クローラを構成するスプロケット、アイドラについては TrackWheel コンポーネントを、履帯部については Track コンポーネントをそれぞれ用いてパラメータ設定をすることでモデル化している。詳細は割愛するが AGX 版において履帯は、Track コンポーネントを用いて、44 枚の等間隔に配置された平板がクローラの外周軌道を周回する、というモデル化がなされている。

### 4.2 土砂モデル

Unity 標準の地形オブジェクトである Terrain に対し、AGXUnity が提供する DeformableTerrain コンポーネントをアタッチしている。これは AGXTerrain の形状を Terrain 形状と同期させるものであり、この GUI を用いて、土砂の物理特性パラ

メータの設定等を行う。また、粒子の可視モデルについては粒子数が増えても対応可能なよう、AGXUnity の DeformableTerrainParticleRenderer に、バグフィックスを行うための改良を一部加えて利用している。なお、DeformableTerrain コンポーネント内の TerrainMaterial で設定可能な土砂の物理パラメータは多岐に渡るが、AGXUnity 側から 3 種類のプリセットが提供されている。公開中のシミュレータにおいては dirt\_1 という名前のパラメータセットを選択しており、これは典型的な粘性質の泥を模擬するのに推奨されるパラメータとなっている。詳細については文献 14) を参考にされたい。

### 4.3 建設機械と土砂間の相互作用

AGX 版においては、PhysX 版で実装できていない、土砂が崩壊や変形を生じている際に建設機械と土砂との間に相互作用する力を算出可能である。それは 4.2 節に記した、Terrain の設定に加え、油圧ショベルのバケットリンクに AGXUnity が提供する DeformableTerrainShovel をアタッチし、Top Edge、Cutting Edge、Cutting Direction を設定し、前節に記した Deformable Terrain コンポーネント中の Shovels リストにバケットリンクを登録することで、相互作用力の計算および DEM を用いた地形の変形挙動がシミュレートされる。

## 5. シミュレータの比較評価

本章では、先述した PhysX 版と AGX 版の 2 種のシミュレータについて、機能・性能および特徴の差を定量的に示すための比較評価を行った結果を記す。なお、いずれのシミュレータについても今後も継続的に改良を行っていく計画であり、本稿に記すのは飽くまで 2023 年 8 月時点のものであることを付記させていただく。

### 5.1 要領

以下の 1) ~ 4) の手順にて行う。

- 1) 作業機のリーチ以上の広さを有する土砂平面上に油圧ショベル zx120 を配置する
- 2) 油圧ショベルに対し、OPERA が提供する自動化パッケージ zx120\_ros<sup>15)</sup>を用いて、バケット刃先を図-4 に示す軌跡を辿らせる掘削動作を行わせ、動作中の各関節角度プロファイルを取得する
- 3) 動作後の地形形状を取得する
- 4) 各関節角度プロファイルおよび地形形状を以下の 3 条件で比較する

<条件 1> PhysX 版シミュレータ

<条件 2> AGX 版シミュレータ

<条件 3> 実機および実フィールド

なお、条件 3 の実フィールドについては OPERA が提供する、土工フィールド（茨城県つくば市）を

用いた。本実験場は関東ローム質の地盤である。試験のための土質調整等は特に行わず、平面であること以外は成行きとする。また、地形形状についてはハンディレーザスキャナ（Leica 製 BLK2GO）を用いて計測する。



図-4 試験セットアップ

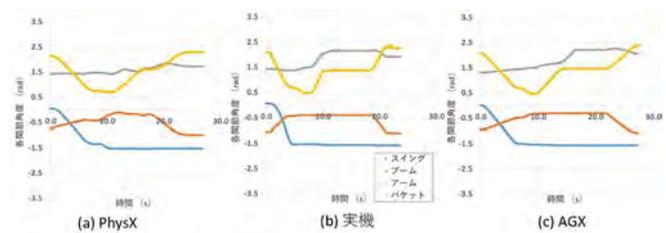


図-5 動作時の各関節角度プロファイル比較

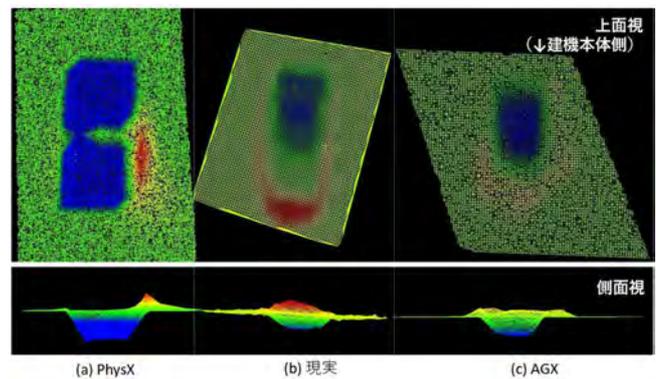


図-6 掘削後の地形（標高地図）比較

### 5.2 評価結果

図-5 に、実機およびシミュレータ (PhysX 版、AGX 版) それぞれの建機モデルの、作業機各軸の角度プロファイルを示す。この結果より、2 種のシミュレータいずれにおいても、実機よりも動作が遅く（角度変化率が約 1/2 程度）、誤差を伴う結果であった。また、実機は 20~22 秒程度の間、バケット軸が振動的な変化を示しているものの、いずれのシミュレータにおいてもこのような変化は見られなかった。このことから、建機モデルについては、PhysX 版と AGX 版とは同等と言える。

また、図-6 に実機およびシミュレータ (PhysX 版、AGX 版) それぞれの建機モデルが掘削動作を終了した後の、掘削箇所近傍の標高地図（ワイヤフレーム）を標高値でヒートマップ表示したものを示す。

PhysX 版は現実に見られるような、建機本体に近い側に形成される隆起が見られず、右側面にのみ隆起が形成された。また、掘削された箇所は現実よりも倍以上深い（標高が低い）結果となり、現実との乖離が大きい。一方で AGX 版については現実と同様に、建機に近い側を中心に弓なり形状に隆起地形が形成され、掘削された箇所の深さは PhysX 版よりも現実との乖離が小さかった。以上より、地形変形のシミュレーション精度は AGX 版の方が現実によく合致すると言える。

### 5.3 考察と今後の方針

建機モデルについては、PhysX 版と AGX 版のいずれにおいても、実機との合わせ込みが共に不十分であり、乖離が大きい結果となった。実機は様々な非線型要素や相互干渉を伴う複雑なシステムであり、モデル化やパラメータ同定といった開発課題が残留している状態である。今後は建設機械メーカーの知見や関連する先行研究を調査し、必要かつ十分なモデルの改良とパラメータ同定により、実機と建機モデルとの合わせ込みを進める。

掘削による地形変形については、PhysX 版の方が現実との乖離が大きい結果であった。これは 3.3 節に記した通り、建設機械と土砂間の相互作用については、現実の物理現象をある程度無視した簡易的な実装をしていることの現れである。こういった問題について、シミュレータの精度を向上する取組みは継続していく予定であるが、地形の変形精度や、建機が地面から受ける反力を重視するユーザは、AGX 版を活用いただくことを検討いただきたい。

## 6 おわりに

本稿では、土木研究所が開発・整備・公開している自律施工技術基盤 OPERA が提供する 2 種類の動力学シミュレータについて、紹介した。加えて、これらの動力学シミュレータの演算結果と現実とが、どの程度一致するか比較する実験を行った。その結果、本稿執筆時点では、建設機械の挙動については PhysX 版と AGX 版いずれも実機との差異は同等であった。また、地形変形については、AGX 版の方が PhysX 版よりも現実により近い結果が得られた。これらは AGX Dynamics が有する、商用ライブラリの技術的優位性を示す結果と言える。PhysX 版の地形変形模擬機能については、筆者らが簡易的に実装を行ったものであるため、現状は機能面で AGX Dynamics 版に比較して劣るものの、建設機械の動作は同等の結果であった。この結果から、地面と建機との相互作用や地形の変形を精緻にシミュレートすることが必要な利用者は、有料の AGX Dynamics 版の利用を検討する価値があるが、そうでない利用者は、PhysX 版を利用することが妥当である。

今後は、PhysX 版についても、地形変形についての精緻化や反作用力のシミュレータ機能の実装を進

めていく方針であるが、AGX Dynamics 版が持つ優位性を超えるレベルを目標にすることは考えておらず、利用者からの意見を踏まえながら、オープンソースの形で継続的な改良を進める予定である。

本稿で紹介した PhysX 版および AGX 版のシミュレータはいずれも、GitHub にて公開しており、誰でも利用できる。利用者からのフィードバックは大変貴重であり、これらに応える形で、利便性向上のための継続的なサイクルを実現していく。

### 謝辞

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。

### 参考文献

- 1) 遠藤大輔, 山内元貴, 橋本毅, 情報開示型自律施工技術基盤の開発状況と今後の展望, JCMA シンポジウム, 2022 年
- 2) GitHub: pwri-opera, <https://github.com/pwri-opera> (参照 2023-8-4)
- 3) Open Robotics: ROS, <https://www.ros.org/> (参照 2023-8-4)
- 4) Open Robotics: GAZEBO, <https://gazebosim.org/> (参照 2023-8-4)
- 5) つくばチャレンジ実行委員会: つくばチャレンジ2023, <https://tsukubachallenge.jp/2023/> (参照 2023-8-4)
- 6) Unity: リアルタイムコンテンツ制作を担う世界をリードするプラットフォーム, <https://unity.com/ja> (参照 2022-8-29)
- 7) Unreal Engine: 世界で最もオープンで高度なリアルタイム 3D 制作ツール, <https://www.unrealengine.com/ja/> (参照 2023-8-4)
- 8) Open Dynamics Engine, <http://ode.org/> (参照 2023-8-4)
- 9) Bullet Real-Time Physics Simulation, <https://pybullet.org/wordpress/> (参照 2023-8-4)
- 10) NVIDIA.DEVELOPER: PhysX, <https://developer.nvidia.com/physx-sdk> (参照 2023-8-4)
- 11) AGX Dynamics: Real-time multi-body simulation, <https://www.algoryx.se/agx-dynamics/> (参照 2023-8-4)
- 12) Daniel, H., et al: "Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments", ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D 2018
- 13) Algoryx: AGXUnity, <https://github.com/Algoryx/AGXUnity>, (参照 2023-8-4)
- 14) Tomas, B., Mertin, S., Tech report V1.01agxTerrain, [https://www.algoryx.se/download/agxTerrain\\_tech\\_report.pdf](https://www.algoryx.se/download/agxTerrain_tech_report.pdf) (参照 2023-8-4)
- 15) zx120\_ros: OPERA 対応油圧ショベル zx120 の土木研究所公開 ROS パッケージ, [https://github.com/pwri-opera/zx120\\_ros](https://github.com/pwri-opera/zx120_ros) (参照 2023-8-4)