

# OPERA 機械土工用 シミュレータの高精度化に 関する共同研究報告書

## (1) 油圧ショベルによる 掘削地形高精度化のための 土砂モデル係数同定

令和7年10月

国立研究開発法人 土木研究所

国立大学法人 筑波大学  
システム情報系知能機能工学域  
知能ロボット研究室

Copyright © (2025) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# OPERA 機械土工用 シミュレータの高精度化に 関する共同研究報告書

## (1) 油圧ショベルによる 掘削地形高精度化のための 土砂モデル係数同定

### 要 旨 :

本研究は、油圧ショベルによる掘削作業の自動化を動機としている。OPERAの構成要素の一つである機械土工用シミュレータを用いて、その掘削による油圧ショベルの軌跡により、実際の掘削地形がシミュレータ内でも再現できることをめざした。この再現が可能になれば、施工前の地形を出来形の地形にしていく油圧ショベルの動作計画の自動化に道を開くことができる。土砂モデルに含まれる4つの係数を、実地試験とシミュレーションで得られた三次元点群の比較により最適化する手法を提案した。最適化には2つの点群間の距離を表すため本研究で定義したMean Distanceを評価値として用い、現実の掘削地形とシミュレータ内の地形の類似性を評価した。また、異なる掘削条件でも再現性が保たれるかを検証した。検証の過程でソフトウェアの不具合も指摘しており、実際の掘削地形を表現する3次元点群の座標系とシミュレータ内で生成する3次元点の座標系間の座標変換を求める際の課題も明らかにした。今後は他環境での有効性を多くの事例で検証すること、また係数探索を数理的に実装することが課題である。

キーワード : 油圧ショベル、シミュレータ、パラメータ同定、OPERA、ICP

## 序論

建設機械を自動化するためには、動作制御技術の高度化が必要であるが、実際の建設機械と試験場を常に用いて開発を進めることは非効率である。近年、自動車や産業用ロボットの動作制御の分野では、シミュレータを用いたモデルベース開発が広く行われるようになってきたが、建設機械は非線形要素の多い複雑なシステムであり、また作業対象物である地面については不確実性が高く、建設機械との相互作用を精確にモデル化し、モデル中の各パラメータ（以降、モデルパラメータ）を同定することが難しい。このため、建設機械の動作制御についてはモデルベース開発が限定的な利用にとどまっている。

本研究では、建設機械の自動化技術におけるモデルベース開発を促進するため、自律制御技術基盤 OPEPA が内包する油圧ショベルの動作、および土砂地盤の変形挙動のシミュレーション結果と、現実の結果との乖離を低減する（高精度化する）ことを目的とする。

公募の結果、下記の機関とそれぞれ共同研究を実施した。

- ① 国立大学法人 筑波大学：  
期間：令和 6 年 3 月～令和 7 年 3 月
- ② 国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学：  
期間：令和 6 年 4 月～令和 8 年 3 月（予定）

本共同研究は上記機関が集まり一つの研究を行うのではなく、それぞれが土研と個別に共同研究を行った。従って報告書もそれぞれ別個に作成している。本報告書は ① 国立大学法人筑波大学と実施した個別共同研究の成果について報告するものである。

本個別共同研究の研究担当者（令和7年3月現在）

所属		氏名
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 上席研究員	山口 崇
	技術推進本部 上席研究員（特命事項担当）	橋本 毅
	技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員	遠藤 大輔
	技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員	山内 元貴
	技術推進本部 先端技術チーム 専門研究員	阿部 太郎
国立大学法人 筑波大学	システム情報系 教授	坪内 孝司
	システム情報系 教授	永谷 圭司
	システム情報系 教授	大矢 晃久
	システム情報系 准教授	伊達 央
	システム情報系 助教	萬 礼応
	理工情報生命学術院 システム情報研究群 情報理工学学位プログラム 博士前期課程2年次	圓井 雄太

**OPERA 機械土工用シミュレータの高精度化に関する共同研究報告書**  
**(1) 油圧ショベルによる掘削地形高精度化のための土砂モデル係数同定**

目次

序論

1. はじめに	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 研究課題および研究目的	1
2. 関連研究	3
2.1. 個別要素法 (DEM) を用いた土砂挙動シミュレーションの研究	3
2.2. 自動施工技術基盤 OPERA	3
2.3. OPERA シミュレータにおける土砂モデル	4
3. 提案手法	5
3.1. 概要	5
3.2. 実環境における掘削地形の取得	6
3.3. シミュレータにおける掘削地形の取得	7
3.4. 実環境及びシミュレータ環境における掘削地形の位置合わせ	8
3.5. 掘削地形の類似性の評価とその基準の検討	10
4. 土砂モデル係数の同定	12
4.1. 考え方	12
4.2. 安息角を求める実験と結果	13
4.3. 土砂モデル係数同定に向けた実験	14
5. 同定した土砂モデル係数によるシミュレーションに関する課題	18
5.1. 異なる日時および掘削軌道による掘削地形の再現性	18
5.2. 三角コーン近傍のみで位置合わせ ICP を行うことについての問題	20
5.3. 掘削地形のみの位置あわせによる評価	22
6. おわりに	24
7. 研究成果	26
参考文献	27

## 1. はじめに

### 1.1. 研究背景

建設業の就労者数は年々減少しており、特に技能者の減少が顕著であることが国土交通省の報告により明らかにされている[1]。また、就労者の高齢化の進行は建設業界における深刻な課題となっている。このような状況を背景に国土交通省は2016年からICTを全面的に活用した取り組みである i-Construction [2] を推進し、建設現場作業の生産性向上を目指している。令和6年度4月には i-Construction 2.0 [3] が策定され、安全で快適な環境下で少人数でも生産性の高い建設現場の実現を目指したオートメーション化による省人化に向けた取り組みが進められている。このような取り組みからも、建設現場における施工・作業の自動化が注目されている。

掘削作業を伴う建設現場では、油圧ショベルによる掘削作業の自動化に、生産性・安全性向上の面から大きな期待が集まっている。掘削の自動化を目指す先行例としては、施工前に施工後の形状を三次元情報で設定し、レーザセンサーを用いて掘削後の各時点での掘削地形を計測し、バケットの位置制御を行う手法が提案されている[4]。しかし、たまたま掘削してできた地形が、この後の操作によっても施工後の形状に到達できないものになってしまう可能性もあり、現場で掘削をする前に、油圧ショベルの動作によって生じる地形の予測、すなわちシミュレーションができるとよいと考えられる。また、物理シミュレーションを活用して掘削作業の時間効率の向上を試みる研究[5]がある。掘削軌道を、すくい込み、水平掃引、掬い上げなどに類型化し、軌道をパラメトリックに定義し、これを組み合わせた軌道における掘削量や時間効率を、ガウス過程回帰を用いた機械学習で最適化することで軌道計画をすることが試みられた。

先行研究を踏まえると、今後の重要な課題は「油圧ショベルが掘削操作を行うたびに生じる地形変化を予測し、最終的な施工の地形が想定できるようにすること」、「予測された結果を油圧ショベルの動作計画として利用できるようにすること」である。予測のためには、実土砂の物理特性を反映した、油圧ショベルのバケット動作に伴う土砂挙動のシミュレーションが重要となる。このようなシミュレーションが高い信頼性で可能となるならば、

- A. 油圧ショベルの動力学モデルや土砂挙動を再現する物理シミュレータにより  
所望の土砂形状を達成する作業計画を立てる
- B. その作業計画を実機に反映する

という手順による施工の自動化が可能となる。

### 1.2. 研究課題および研究目的

上述の用途に適するシミュレータを含むシステムとして、土木研究所先端技術チームが開発している自律施工技術基盤 Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy、通称 OPERA がある。OPERA は油圧ショベルを含む動力学モデルや土砂挙

動を再現する土砂挙動シミュレーションを行う機能を有しており、これを用いて計画された油圧ショベルの動作をそのまま実機で実現できる[6][7]。この土砂挙動シミュレータは、現実の土砂挙動を模擬するために松坂ら[7]が開発したものであるが、そのシミュレーションのために設定する必要がある土砂モデル係数をどのように適切に設定すればよいのかについての定式化が未だなされていない、という課題があった。すなわち、このシミュレータの実装はできたが、それに必要な土砂モデル係数を適当に与えただけでは、シミュレータで得られた掘削地形と実際の掘削地形に乖離が生じるという課題が発生していた。

そこで本研究では、この土砂挙動シミュレータにおいて設定されている土砂モデル係数を決定し、油圧ショベルによる土砂掘削時の物理シミュレーションにおいて現実環境における掘削後の土砂地形を再現することを目的とした。

本論文は次の構成で記述する。第2章では土砂モデルに関する関連研究、本研究で扱うシミュレータにおける土砂モデルを示し、第3章で提案する土砂モデル係数同定手法を説明する。第4章では、同定した係数を用いてシミュレータ上で実掘削地形を再現できるかを評価し、第5章でその結果より明らかになった課題を考察するとともに追加検証を行う。第6章で、本研究のまとめと今後の展望を述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1. 個別要素法 (DEM) を用いた土砂挙動シミュレーションの研究

個別要素法 (Discrete Element Method: DEM) [8]は Cundall らによって提案された手法で、土砂の掘削挙動の解析において広く用いられている。例えば、Coetzee らは、DEM を用いて土砂掘削時にバケットに作用する抵抗力の解析し、その計算結果を実験結果と比較することで掘削時の抵抗力の一般的な傾向が正確にモデル化されることを示している[9]。以降より DEM を土砂挙動シミュレーション活用した例を紹介する。

Tsuji らは、Utli らが提案した DEM の粘着力モデル[10]を使用し、ブルドーザによる土砂の整地および掘削作業のシミュレーションを行い、実験結果と比較した結果、掘削された土塊の特徴的な挙動である、転がり運動や断続的な崩壊する様子を観察し、その有効性を示している[11]。油圧ショベルに於いても動力学解析と DEM を組み合わせたシミュレーションによって、建設機械の掘削性能の解析が行われている。例えば、Yoshida らは、油圧ショベルの作業機を Newton-Euler 法を用いて定式化し、DEM で土砂をモデル化し、それらを統合した動力学シミュレーションを構築することで自動掘削における制御性能の評価を行っている[12]。Gruening らは、油圧系や駆動系を含むマルチボディシステムと DEM を組み合わせたシミュレーションを実施し、ホイールローダや油圧ショベルによる掘削作業のシミュレーションが行っている[13]。Haut らは、各種機構や各リンク間に対するバケット軌跡を計算し、その軌跡を基に DEM を用いて掘削力の計算を行う手法を提案している[14]。上村らは、土砂を DEM によってモデル化し、剛体・油圧駆動システムとのコシミュレーションを行うことで、土砂の掘削挙動を考慮した剛体・油圧駆動システムの動的シミュレーションを実現している[15]。この研究では、土砂の特性に基づく油圧駆動システムの性能評価が可能であることが示されている。

一方で、DEM は土砂粒子シミュレーションにおいて非常に有効な手法であるが、粒子の質量、加速度、慣性モーメント、接触力、ばね定数、減衰定数、摩擦係数といった多くの係数を適切に設定する必要がある。このような、モデル係数の設定には、専門的な知識や経験が求められ、適切な設定を行うことは容易ではない。

### 2.2. 自動施工技術基盤 OPERA

本研究で用いる自動施工技術基盤 OPERA(Open Platform for Earth with Robotics and Autonomy) について説明する。OPERA は誰もが利用可能なオープンプラットフォームであり、自動施工や遠隔操縦等の新技術開発においてシミュレータをベースとした油圧ショベル等の建機の動作シーケンスの開発が可能であることに加え、その開発物を修正せずに実機に接続し、実機を動作させてその動きを検証できる。

### 2.3. OPERA シミュレータにおける土砂モデル

OPERA の構成要素の一つである OPERA シミュレータについて述べる。シミュレータプラットフォームは Unity[16]が用いられており、物理エンジンが異なる二つのシミュレータがある。このうち本稿では Nvidia PhysX[17] を物理エンジンに使用したもの、PhysX 版シミュレータを対象とする。掘削に伴う地形変化は土木研究所の松坂ら[7]により提案された土砂モデルによりなされている。土砂モデルの概要を Fig. 2.2-1 に示す。この土砂モデルは Daniel Holtz らにより提案されたモデル[18] を参考に開発されたものである。一般的な水分を含んだ土砂に見られる粘性を伴う挙動を模倣可能である。土砂を一定の粒子半径 $R$ を持つ粒子群としてモデル化し、現実よりも土粒の数を低減することで計算コストを抑え、リアルタイムな土砂挙動模倣を実現している。隣接する粒子間の距離 $R$ 、固着力作用距離 $D$ 以下の場合には粒子間固着力 $F$ を作用させ、それらの距離よりも離れた場合は粒子間固着力を作用させないことにより粘性が模倣される。また土砂が滑り出さない最大傾斜角 $\varphi$ （安息角とも呼ぶ）も設定可能である。これらは土砂挙動が静止した後の地形をシミュレータで表現することに寄与する係数である。この土砂モデルにおける係数は $R$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $\varphi$ の4種類のみであり、関連研究で示された DEM を基にした土砂モデルよりも係数の数が抑えられている。

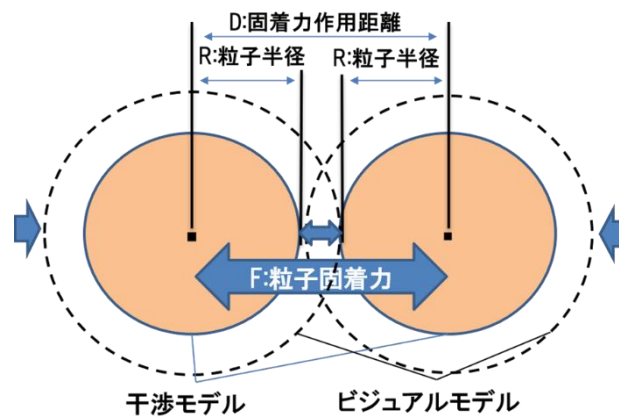


Fig. 2.2-1 PhysX 版シミュレータにおける土砂モデル

### 3. 提案手法

#### 3.1. 概要

土砂モデル係数を同定するために、本研究では

- ① 実環境において掘削地形を取得する
- ② シミュレーションにおいて掘削地形を取得する
- ③ 実環境とシミュレーションにおける掘削地形の位置合わせを実施する
- ④ 位置合わせ後の掘削地形差分を取る
- ⑤ 土砂パラメータを変化させ、掘削地形差分が小さくなるパラメータを見つける

という手順をとることを提案する。この手順のうち、手順④にある掘削地形差分とは、実際に油圧ショベルで実際に掘削した地形と、シミュレータ上で実際と同一の軌跡で掘削した地形の差異を表す。本研究では、その掘削地形差分を定量的に表すものとして、Mean distance を用いた。

この Mean Distance の定義は以下の通りである。現実環境で取得した点群の各点総数  $L$  個のうち、 $j$  番目の点の座標を  $P_j^R = (x_j^R, y_j^R, z_j^R)$  とし、シミュレーションによって取得した点群の各総点数  $M$  個のうち、 $i$  番目の点の座標を  $P_i^V = (x_i^V, y_i^V, z_i^V)$  とする。最近傍点の組を  $N$  組とり<sup>1</sup>、その  $m$  番目の最近傍の点の組が  $P_k^R, P_l^V$  であったとする。その組の点の間のユークリッド距離  $d_m$  は、

$$d_m = \sqrt{(x_l^V - x_k^R)^2 + (y_l^V - y_k^R)^2 + (z_l^V - z_k^R)^2} \quad (3-1)$$

であり、この  $N$  組の平均を Mean distance  $MD$  とする。すなわち、

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N d_m \quad (3-2)$$

である。最近傍点は、現実環境で取得した点群の一つ  $P_k^R$  に対し、シミュレーションによって取得した点群のうち、ある距離の範囲内でもっとも近い点  $P_l^V$  を探し、これを組にするものである。ただし、 $\min(L, M) \geq N$  とし、現実環境やシミュレーションによって取得した点群から作成した最近傍点の組をすべて用いず、必要に応じてその中の一部を利用する、すなわち点群を間引いて利用する場合もあり得る。この Mean distance の計算が成り立つために、実際に掘削した地形の点群内の点を表現する座標系と、シミュレーションにより得られる点群を表現するそれとの間の位置合わせ、すなわち座標変換を得ておく必要がある（上記手順③）。

手順⑤において、シミュレータで掘削地形を求める際、土砂モデル係数の組を複数用

---

<sup>1</sup> 双方の環境における掘削形状の点群数やその分布は異なり、点群内の各点に振られた番号についても、双方の点群に於いて対応していない。そこで、双方の点群における最近傍点同士の対応付けを行って  $N$  組をとっている。



Fig. 3.1-1 実環における掘削後の地形形状 3次元点群データ

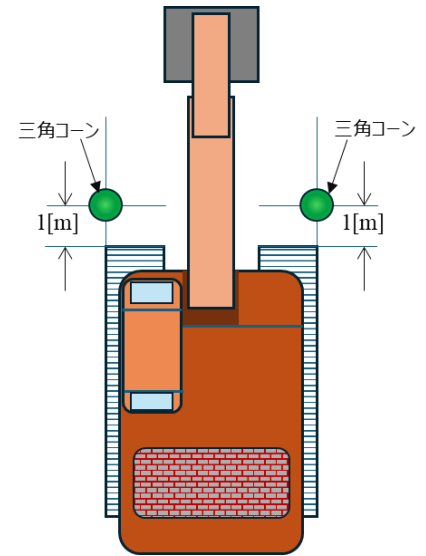


Fig. 3.1-2 位置合わせのための三角コーンの配置

意してそのそれぞれに対してシミュレーションを行い、その土砂モデル係数の組とシミュレータの掘削地形とを紐づけておく。実環境での掘削地形に対して、その土砂モデル係数の組に応じて得られたシミュレーションでの掘削地形について、それぞれ位置合わせを行って点群を共通座標系に一致させ **Mean distance** を求めれば、これが最も小さくなるものがあれば、その組が適当な土砂モデル係数として同定できると考えた。

### 3.2. 実環境における掘削地形の取得

実環境における掘削地形の取得は、以下の手順で実施した。

- ① 油圧ショベルにより掘削を実施する
- ② シミュレーションに於いても同じ掘削動作を行う必要があるため、油圧ショベルのブーム、アーム、バケットの各関節角の時間推移などの動作履歴を残す
- ③ 掘削地形及びその周辺形状をハンディレーザスキャナ等でスキャンし、3次元点群として形状を得る

上記の手順に則り、土木研究所が所有する実験施設である DX フィールドにおいて実機実験を行い、掘削形状を取得した。土質は関東ロームである。使用した油圧ショベルは日立建機製の ZX120 であり、自動運転可能な装置を追加搭載した特別仕様機である。同機には、上部旋回塔と足回りの間、および、上部旋回塔とブームの間、ブームとアームの間、アームとバケットの間の関節角を計測するアブソリュートエンコーダや車体の対地傾斜角を計測する IMU などが搭載されており、運転台に搭乗した操作者が油圧シ

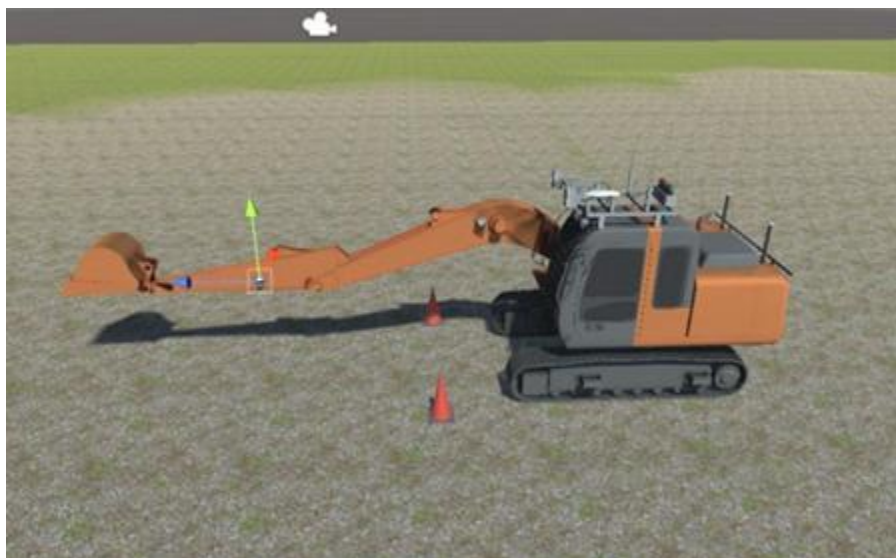


Fig. 3.2-1 シミュレータ環境での実験環境

(実機実験で使用した油圧ショベルのモデルと、実機実験で設置したコーンを Fig. 3.1-2 と同様の位置に設置した。掘削地形を計測するためのレーザスキャナは図中の黄枠の箇所に設置した。

ショベルを操作した際にも、また自動運転をした際にも各部の動作履歴を Rosbag 形式で記録することができる。掘削後の地形は、ハンディレーザスキャナ Leica BLK2GO を人が持って掘削地形や油圧ショベルの機体の周囲を徒歩で周回し、3次元点群として取得した。

得られた掘削形状およびその周辺形状を Fig. 3.1-1 に示す。掘削形状およびが3次元点群として取得されていることが分かる。なお、油圧ショベル手前にクローラの両側面の延長前方1[m]のところに三角コーンの頂上があるよう (Fig.3.1-2) に、三角コーンを配置して、その3次元点群形状も取得した。これは3.3節で述べる実機及びシミュレーションにおける掘削形状の位置合わせのためのものである。

### 3.3. シミュレータにおける掘削地形の取得

シミュレータに於ける掘削地形取得は以下の手順で実施した。

- ① 実機の形状や質量を模倣した油圧ショベルをシミュレータに用意する
- ② 実機による掘削時に取得した動作履歴に従い、シミュレータにて掘削を実施する
- ③ 掘削地形及びその周辺形状を3次元点群として取得する

シミュレータにおける油圧ショベルを Fig. 3.2-1 に示す。3.1章で使用した実機油圧ショベルの形状や質量、挙動を模倣したものである。

シミュレータ環境での掘削地形3次元点群取得には、Field-Robotics-Japan が Github で公開されている UnitySensor[19] で利用できる仮想センサのうちから、Velodyne LiDAR

VLP-16 を使用した。仮想センサをシミュレーション環境内における掘削地形、油圧ショベルをスキャン可能な位置に配置し、3次元形状を取得した。また、シミュレータにおいても、3.1 節の実掘削地形取得の際と同様にコーンを設置し、実機掘削形状との位置合わせに使用した。

### 3.4. 実環境及びシミュレータ環境における掘削地形位置合わせ

続いて、実際に油圧ショベルが掘削した地形の3次元点群と、シミュレーションにて掘削した地形の3次元点群の位置合わせを以下の手順により実施した。

- ① 実環境及び、物理シミュレータでコーンを配置した場所の点群を切り抜く
- ② 2つの切り抜いた箇所同士で、目視よりおおよその位置を合わせる
- ③ ICP (Iterative Closest Point)アルゴリズム[20]を適用し、2つの点群の座標系の関係を基底変換として求める。また、この基底変換に基づき、各点の座標変換を行う
- ④ 切り抜き前の点群に座標変換を適用する

なお、ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムは、一つの点群集合の各点に対してもう一方の点群集合の最近傍の点を探索して対応付けを行い、対応付けた点の距離を最小化するよう点群座標系の位置姿勢を調整し、これを **iterative** に行うことで点群集合間の重ね合わせを行うアルゴリズムである。もし地形全体で ICP を行うと掘削位置を考慮することなく、単純に各点における最近傍の点の差が最小になるよう点群の位置姿勢を決定づけてしまうため、掘削位置を一致させることができない。そのため位置合わせのためにコーンを設置しコーン近傍の領域のみで ICP を行い二つの座標系間の基底変換をまず求めるようにした。

実際の例を以下に示す。ICPを開始するための初期条件として、あらかじめ人の目測でコーン位置を重ね合わせた後に、コーンの近傍の点群のみを用いて ICP を行った。

Fig. 3.3-1 は二つのコーン位置の近傍領域を取り出し、それらの点群を目測で重ね合わ

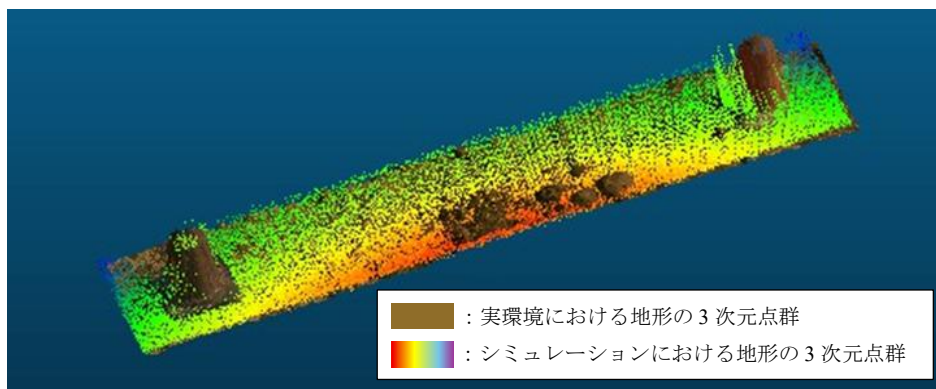


Fig. 3.3-1 手動で位置合わせを実施した状態 (ICP 適用前)

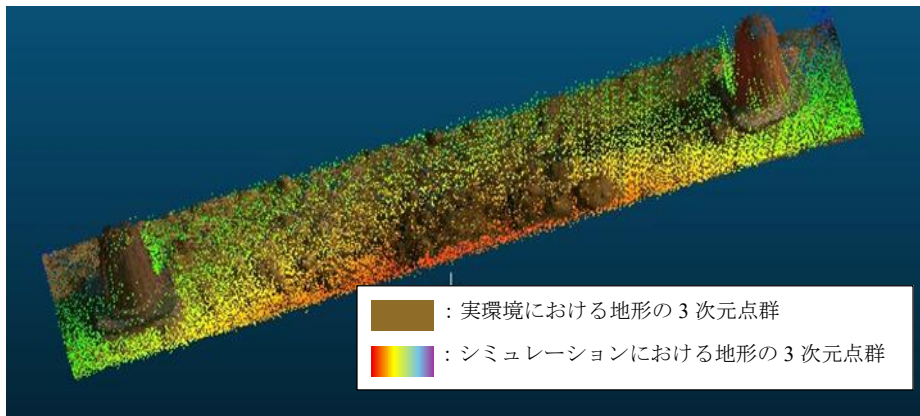


Fig. 3.3-2 ICP 適用後の状態

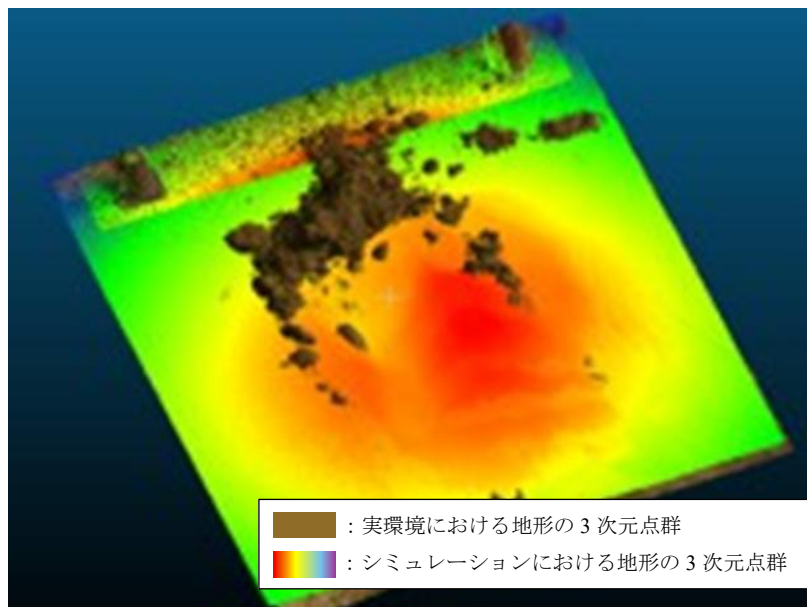


Fig. 3.3-3 手動による位置合わせ後の状態（掘削部込）

せたもの、すなわち ICP を実施する前の状況を示した。Fig. 3.3-2 には、その ICP を実施した後の様子を示す。図中の茶色の点群が現実環境で取得された点群、赤や緑の着色されている点群がシミュレータで取得した点群である。この着色は、シミュレーションで得られた掘削地形に関する点群をシミュレータ内に仮想的に設置したレーザスキャナで得る際に求められる、レーザスキャナが受けるレーザ光の受光強度で行った。受光強度が高いほど赤色に、低いほど緑色に着色している。この両図を見比べると、ICP を開始するための初期条件として、あらかじめ人の目測でコーン位置を重ね合わせているので、Fig.3.3-1 と Fig.3.3-2 の間での変化が分かりづらい面もあるが、前者に比べ、後者のほうが地面に相当する点群の重なりがより良くなっていることは計算結果から確認している。したがって、ここで得られた座標系の間基底変換を採用し、点群全体の座標系の関係を得たものとする。

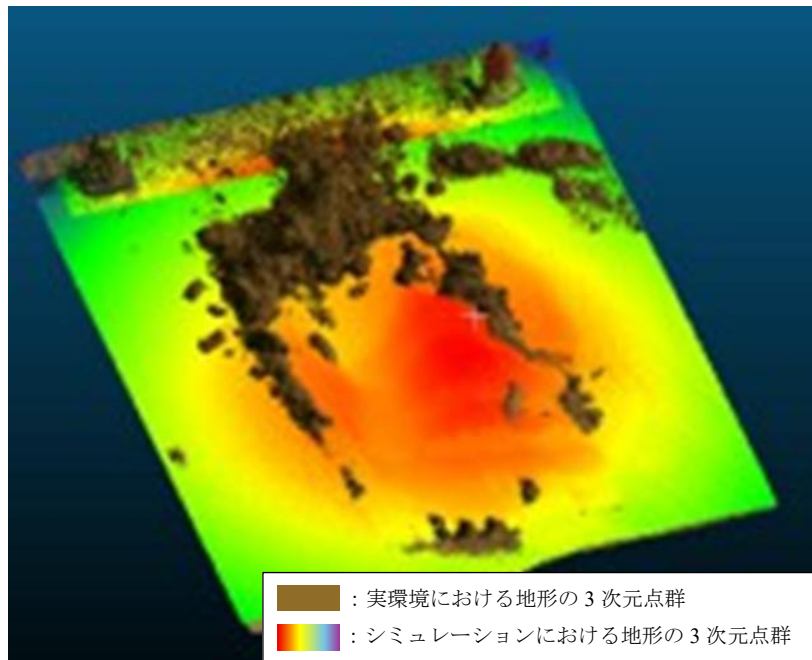


Fig. 3.3-4 ICP 適用後の状態（掘削部込）

ここで得られた基底変換を用いて、実機実験で得られた地形の点群の各点座標とシミュレーションで得られた地形の点群の各点の座標について、一つの座標系で表示できるように座標変換を行った。これによって同一の座標系で両者の点群を同時に表示した点群全体を示す。Fig. 3.3-3 は、Fig.3.3-1 で示した手動による初期条件として重ね合わせたものを取得点群全体で示したもの、Fig. 3.3-4 はここで得られた基底変換に基づく座標変換を行った後の取得点群全体の様子である。

### 3.5. 掘削地形の類似性の評価とその基準の検討

3.3 節で位置合わせを行った後、実環境、シミュレータ双方で得られた地形の3次元点群同士の距離を算出する。点群同士の距離が小さい程、シミュレータが実環境における掘削地形を模倣できていることになる。

実機で掘削した地形と、シミュレータ内で掘削した地形が完全に一致すれば、Mean Distance はゼロとなるが、実際には両者の地形が完全に一致することはない。なぜならば、実際の地形では、掘削地点近傍の平地も自然な凹凸がある一方、シミュレータ内では平坦で凹凸がない環境から掘削をしており、細かな地形の凹凸まで一致させることは行っていないからである。また、掘削した地形そのものも、土砂の挙動を精密に再現できるモデルではないため、実際に掘削を行った時の細かな土砂の塊の崩落まで再現できるとは限らないためである。なお、掘削部分に隣接しており油圧ショベルのバケットが通らなかった、環境における自然な凹凸があるがほぼ平坦とみなせる場所の Mean Distance を求めておけば、掘削地形が一致したとみなせる Mean Distance の目安とする

ことができる。以下の手順より掘削が無い場合における Mean Distance の算出を行って参考値とした。

- ① 3.3 節の方法により実環境、シミュレータ 2 つの地形形状の位置合わせを行う。
- ② 掘削がなされていない領域を切り取る。
- ③ ②で切り出した領域に於いて Mean Distance を算出する。

算出の結果、掘削が無い場合における Mean Distance は 0.021[m]であった。本値を以降の章における参考とする。

## 4. 土砂モデル係数の同定

### 4.1. 考え方

シミュレータにおいて、土砂モデル係数を与えることでその係数に応じた土砂挙動が発現する。実地において地面を掘削した後の地形が、シミュレータ内で掘削した地形とほぼ同等にみなせる土砂モデル係数を同定したい。第2章で述べたように、シミュレータ内での土砂挙動を支配する係数は、固着力作用距離 $D$ 、粒子半径 $R$ 、粒子間固着力 $F$ 、安息角 $\varphi$ の4種類がある。この4種類の係数それぞれの組み合わせの中で、第3章に示したような掘削地形がシミュレータ内で発現する。したがって、実地の環境において建機が掘削した地形を、よく再現するシミュレータにおける土砂挙動モデル係数を同定するには、この4種類の係数の変化に伴う Mean Distance  $MD$ を求め、 $MD$ が極小となる係数の組み合わせを見つけることが主題となる。これは、この4種類の係数 $R$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $\varphi$ を変数とし、 $MD$ を極小化する（準）最適化問題としてとらえることができる。

このような最適化問題を解く場合のもっとも単純なやり方は、これら4つの係数の妥当な変域を定め、その範囲内で適切に量子化した係数値の組み合わせでこれら変数とする目的関数 $MD$ が極小となる係数値の組を探索することである。 $MD$ はもともと(3-1)式および(3-2)式で与えられる二乗誤差規範で与えてあるので、再急降下法などの最適化アルゴリズムを適用することも可能である。しかし本報告では、これらの係数の変化による極小値を探索する単純な方法を取り、目的関数である $MD$ の挙動観察も含めることにした。

一方、この4種類の係数の一つの組を用いて、シミュレータ内で掘削実験を行い、その結果として一つの $MD$ を求めるための計算には10分程度の計算時間が必要である。変化させる係数が4種類あることから、これらのすべてを単純に変化させると、探索のための量子化した係数の組が膨大となり、すべての場合を尽くすための計算には膨大な時間が必要となる。よって、先験的に固定できる係数は固定し、変化させる係数の組を減らす方針をとった。先験的に固定できる係数として、固着力作用距離 $D$ と安息角 $\varphi$ が挙げられる。固着力作用距離 $D$ は、粒子を球として仮定した場合の隣接する粒子（球）の表面間の距離が $D$ 以内であるときに、粒子間固着力 $F$ がその粒子間に引力として働き、 $D$ を超えるときは粒子間固着力が働かないとする距離である。本報告では、後に述べる粒子半径 $R$ の設定や、予備的なシミュレーション実験において、油圧ショベルのバケットから放土されたときの粒子の繋がり具合（粘性）が実機で掘削した際の見え方と同様な観察を与えるように配慮して5[mm]と固定した。また、安息角 $\varphi$ は油圧ショベルのバケットから放土した時にできる土砂の山の勾配から実験的に求めている。このようにして $D$ および $\varphi$ を先験的に決めて固定した後、残りの係数である、粒子半径 $R$ 、粒子間固着力 $F$ については、適切と思われる値域において量子化し、 $R$ と $F$ の値の組を作り、 $MD$ が極小となる組を同定する。

## 4.2. 安息角を求める実験と結果

本節では、安息角を決定する実験について示す。実際の実験環境において、油圧ショベルで掘削した土砂を平坦な地表にバケツから放土し、それにより形成された土砂の山を形成した。続いてその山の部分をレーザスキャナにより計測して3次元点群として得て、そこからその山の断面を点群から抽出した (Fig. 4.2-1、Fig. 4.2-2)。これらの図では、地表からの高さが高くなるほど、暗い緑色から黄色を経てオレンジ色になるように着色している。Fig. 4.3-2 の図中で示した土砂の山を通る縦の2本の線は、その線と線との間に存在する点群を切り取ることを示している。こうして切り取り、抽出した断面

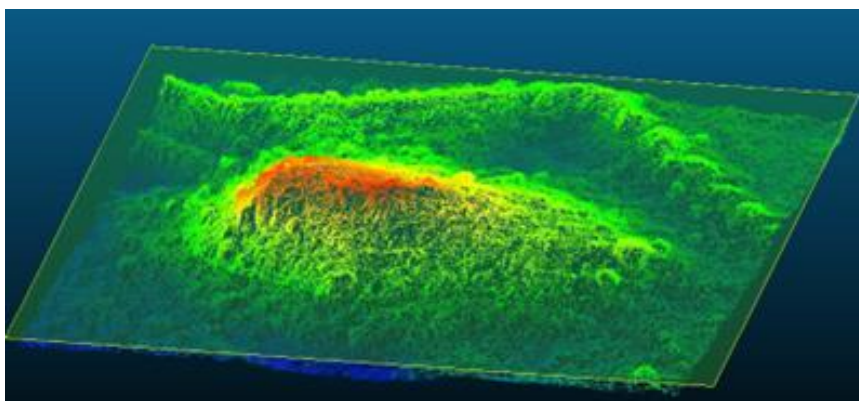


Fig. 4.2-1 平地に放土して形成された山の3次元点群

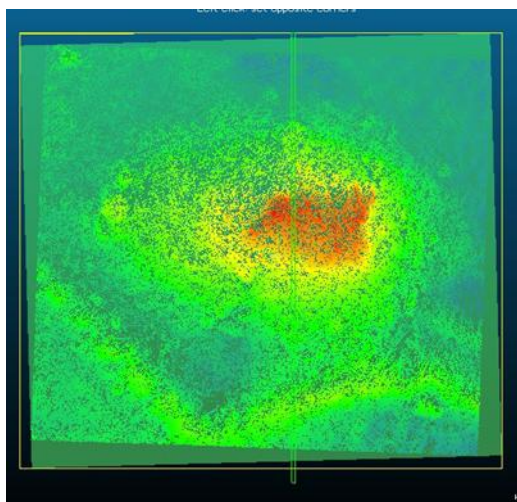


Fig. 4.2-2 平地に放土して形成された山と断面を切り出す線分

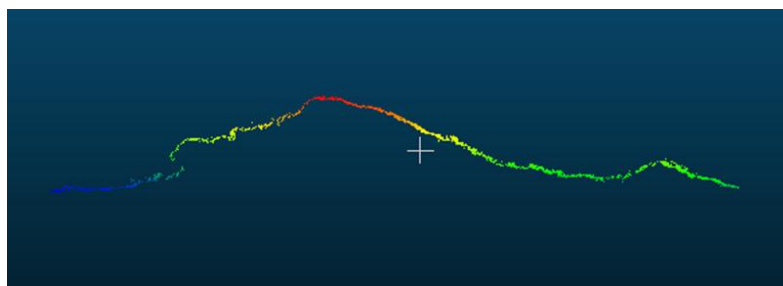


Fig. 4.2-3 平地に放土して形成された山の断面



Fig. 4.2-4 放土して形成された山に目測で当てはめた3角形

を横から水平に見たものを Fig. 4.2-3 に示す。これは放土された山の断面であり、山の左右の稜線上に目測で線分をつなぎ三角形として置き、その線分の角度から安息角を求めた。この三角形の様子を、Fig. 4.2-4 に示す。この図から、山の左右斜面の水平面よりの角度は、 $\angle ABC$ が  $20.8[\text{deg}]$ 、 $\angle ACB$ が  $21.0[\text{deg}]$ となり、安息角 $\varphi$ の値として、 $21[\text{deg}]$ を採用することができた。

#### 4.3. 土砂モデル係数同定に向けた実験

前節までに述べたように、固着力作用距離 $D$ を  $5[\text{mm}]$ 、安息角 $\varphi$ を  $21[\text{deg}]$ 固定としておき、残る粒子半径 $R$ 、粒子間固着力 $F$ を変数として、ある掘削実験において Mean Distance  $MD$ が極小となる $R$ 、 $F$ の組を見つけることを試みた。あらかじめの試行錯誤の後、 $R$ および $F$ の変域をそれぞれ  $5 \leq R \leq 150[\text{mm}]$  として  $10[\text{mm}]$  ごとに、また  $0 \leq F \leq 10$  として1ごとに变化させるように定めた。実験フィールドにおけるある1回の掘削地形と、それを形成した油圧ショベルのバケット軌跡により、これら $R$ 、 $F$ の組でその都度シミュレータで掘削した地形との間で $MD$ を求めて値の変化を観察した。

Fig. 4.3-1 にその結果を示す。図の横軸は粒子半径 $R$ であり、図の縦軸が Mean Distance  $MD$ である。図中の点の色は、粒子間固着力 $F$ をあらわしており、図の上部に点の色と $F$ の値の対応を示してある。この図から、この実験を行った $R$ 、 $F$ の組の範囲で極小値が見つかり、 $R = 110[\text{mm}]$ 、 $F = 6$  の時であることがわかる。

そこで、この値の近傍において、 $R$ および $F$ の量子化の幅をさらに細かくして、 $MD$ の挙動がその周辺でどのようになるか探索的に観察した。本来は、想定される係数値の量子化サイズを細かくして網羅的に計算することが求められるが、そのようにすると計算時間が膨大になるため、今回は手動で探索的な方法による。その結果、 $R = 110.6[\text{mm}]$ 、 $F = 6.1$  のとき、 $MD=39.1[\text{mm}]$  の極小値が得られた。さらに、 $R = 110.6[\text{mm}]$ 、 $F = 6.1$  の周辺の何点かで $MD$ を求めたところでは、 $R = 110.6[\text{mm}]$ 、 $F =$

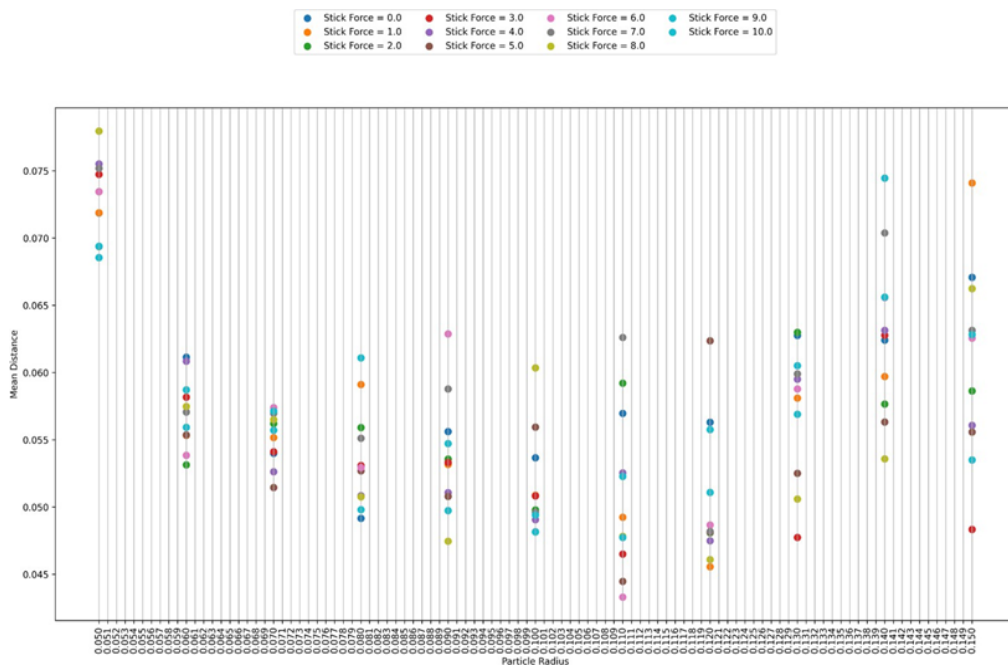


Fig. 4.3-1 粒子半径  $R$ 、粒子間固着力  $F$  の変化による Mean Distance の変化

6.1 の組以外での  $MD$  を調べたところでは、 $MD=39.1[\text{mm}]$  より小さな  $MD$  を与える組はなかった。この様子を Fig. 4.3-2 および Fig. 4.3-3 に示す。

Fig. 4.3-2 において、横軸は粒子半径  $R$ 、縦軸は粒子間固着力  $F$  である。色がついた丸の箇所が試行した  $R$  および  $F$  の値であり、その値の組で得られる Mean Distance  $MD$  の値を数値と色で表現している。色と値の対応は、Fig. 4.3-2 の右側のカラーバーで表示した。Fig. 4.3-3 は、Fig. 4.3-2 の拡大図である。

ここで同定された土砂モデル係数である固着力作用距離  $D=5[\text{mm}]$ 、安息角  $\varphi=21[\text{deg}]$  のもとでの粒子半径  $R = 11.06[\text{cm}]$ 、粒子間固着力  $F = 6.1$  の場合における現実環境の掘削地形の点群と、シミュレータ内で得られた掘削地形の点群を重ね合わせた例を Fig. 4.3-4 および Fig. 4.3-5 に示す。Fig. 4.3-4 はコーンが左右に見え、油圧ショベルが正面に位置する視点から生成した図である。また Fig. 4.3-5 は片側のコーンと、油圧ショベルの側面が見える視点から生成した図である。ただし、油圧ショベルの姿は表示していない。これらの図から、目視上は、現実環境の掘削地形の点群と、シミュレータ内で得られた掘削地形の点群がそれなりに重なっている部分が多いことが観察される。一方で、掘削した地形の底の部分での相違が目立つ部分もあり、課題が残っている部分もある。例えば、掘削した穴の底部に当たる部分が、実際の掘削地形では盛り上がった凹凸があるにもかかわらず、シミュレーションでの掘削地形では、それが現れていないなどの差異がある。しかし、実際に掘削した地形に類似した地形が、土砂モデル係数を適度に与えれば、ある程度シミュレータ内で再現されることがわかった。

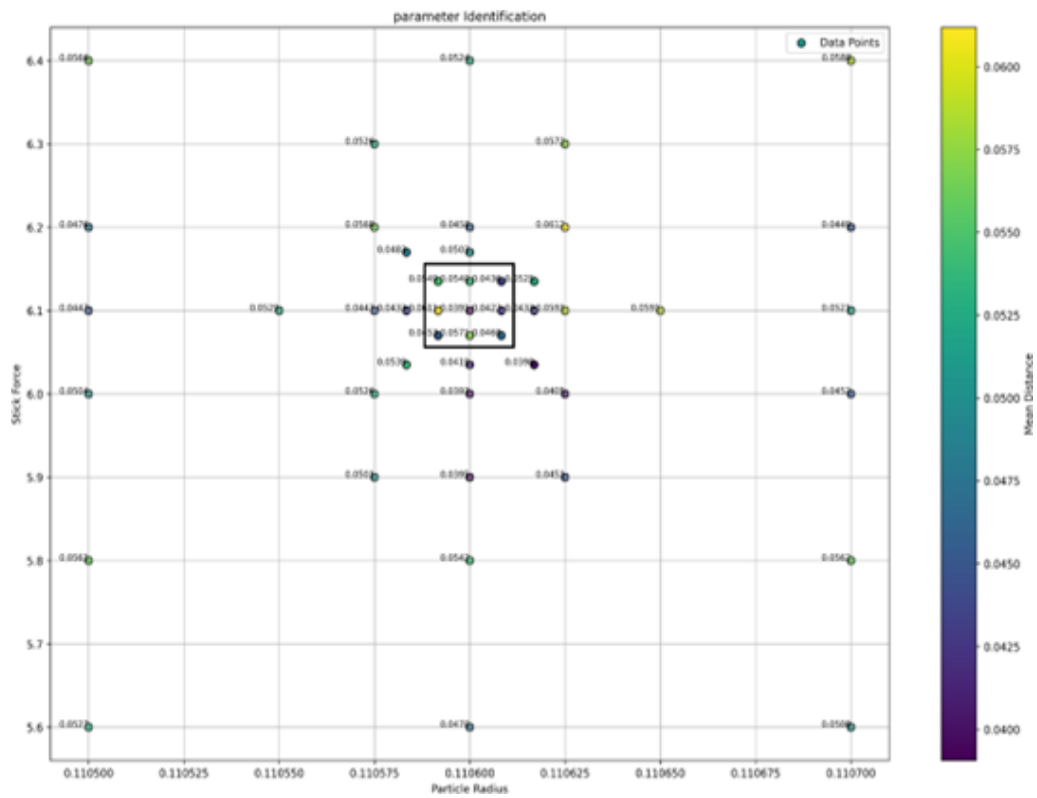


Fig. 4.3-2 粒子半径  $R$ 、粒子間固着力  $F$  の詳細変化による Mean Distance の変化

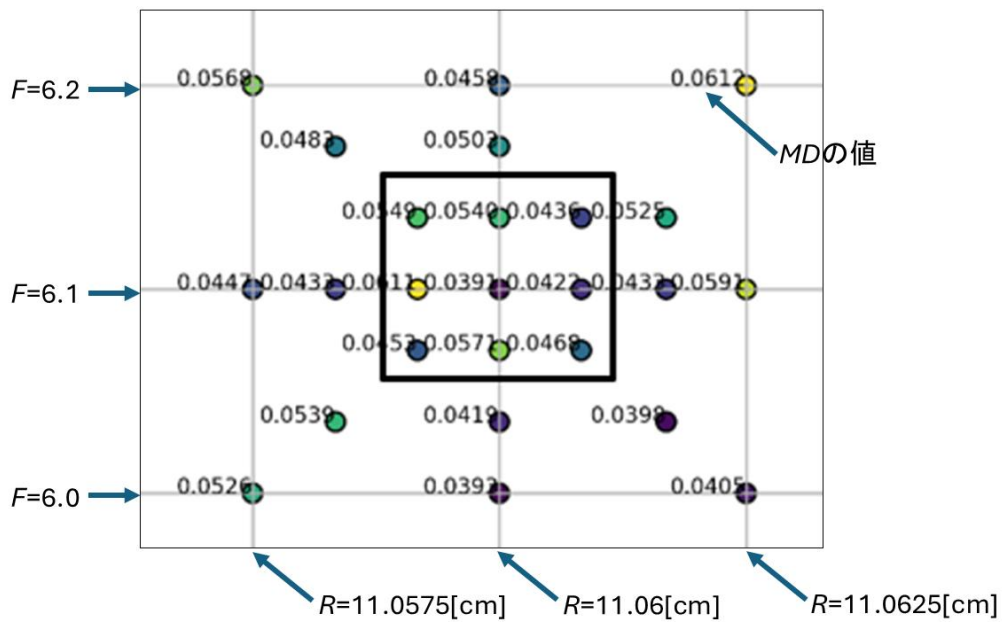


Fig. 4.3-3 前出の Fig. 4.3-2 の中央部分の拡大

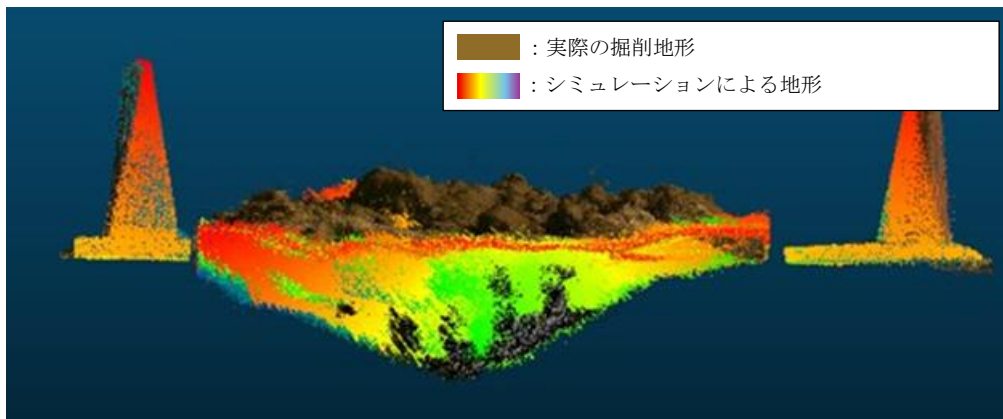


Fig. 4.3-4 同定された土砂モデル係数を用いたシミュレーションによる地形と実際の掘削地形の重ね合わせ（正面）

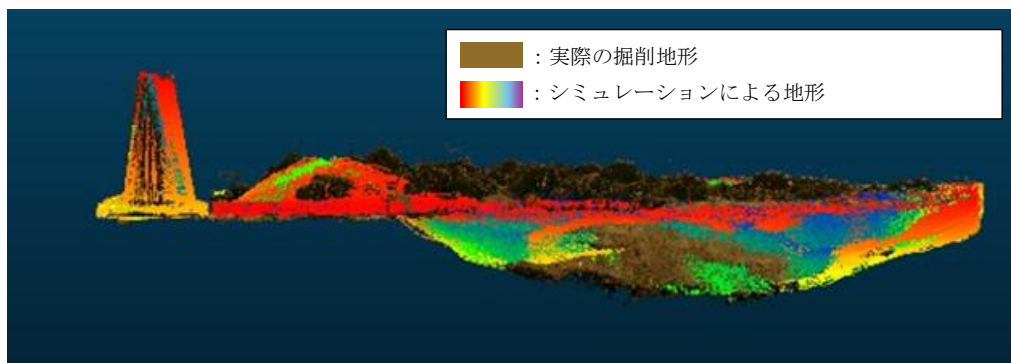


Fig. 4.3-5 同定された土砂モデル係数を用いたシミュレーションによる地形と実際の掘削地形の重ね合わせ（側面）

## 5. 同定した土砂モデル係数によるシミュレーションに関する課題

### 5.1. 異なる日時および掘削軌道による掘削地形の再現性

前節で同定した土砂モデル係数は現実環境のある日時に行った掘削において形成された掘削地形とともに、その掘削にて取得された油圧ショベル各関節の時間軌跡を用いて、現実環境の掘削地形をシミュレータで表現できるよう求めたものである。しかし、研究開発の方向性としては、そのようにして求められた土砂モデル係数がどれほど普遍的であるか検証しておくことが必要である。

簡単な思考実験でも、掘削する現地が全く異なれば、土質が異なることは相違なく、掘削を行う場所ごとに土砂モデル係数を求めなおすことは必要であろう。したがって、本報告における土砂モデル係数の普遍性を言うときには、同様な土質を持つことが期待されるひとつの現実（現場）環境に焦点を絞って考察することが現実的である。たとえばその掘削を行った場所に隣接する場所での掘削や、その場所の土砂モデル係数を同定してから日時が経過したのち同じ現場で再度掘削した時に、ある日時で求めた土砂モデル係数がそのまま利用可能か調べておくことが重要である。

そこでまず、前章で述べた同定する際に使用した現実環境において、掘削地形の点群データとは別に異なる日時、異なる掘削軌道で掘削地形を点群データとして取得し、同定してあった土砂モデル係数で掘削シミュレーションを行った際に、その現実環境の掘削地形を再現するかどうか検証した。掘削地形の再現に関する評価は、土砂モデル係数を同定する際に用いた **Mean distance** を用いた。

前章で述べた土砂モデル係数（固着力作用距離 $D=5[\text{mm}]$ 、安息角 $\varphi=21[\text{deg}]$ のもとの、粒子半径 $R = 11.06[\text{cm}]$ 、粒子間固着力 $F = 6.1$ ）を用い、Fig. 4.3-4 および Fig. 4.3-5 で示した掘削地に隣接する場所で、別の日時に掘削した地形及びその時の油圧ショベルの各関節の軌跡を用いて掘削シミュレーションを行い、現実の地形とシミュレータ内で得られた地形の比較を実施した。Fig. 5.1-1 が現実の掘削地形、Fig. 5.1-2 がシミュレータによる掘削地形である。第3章に述べた方法で、設置してある三角コーンにより位置合わせをしたのちに得られたこの図の両者の比較による **Mean distance** は  $11.4[\text{cm}]$  となり、第4章の最後の例で示した  $3.9[\text{cm}]$  に比べてかなり大きな値となった。実際に、Fig. 5.1-1 と Fig. 5.2-2 を比較しても、目視でも大きな差があることがわかる。その違いは、特にこれらの図において赤い丸で囲んだ部分に顕著である。この実験から見れば再現度は低く、まだ改善の余地があることがわかる。

この再現性が低い問題について、いくつかの考察の後、大きく次の3つの論点についての調査が必要であることが分かった。

- ① 与えられた軌跡でシミュレーションしている際、Fig. 5.1-1 の赤丸で記した部分において、第4章の最後で示した実験に比べて、油圧ショベルの動きが遅いところがあった。第4章で示した実験の時には、そのように動作が遅い部分がなかった



Fig. 5.1-1 第4章4.3節での実験とは異なる日時の掘削における実際の掘削地形

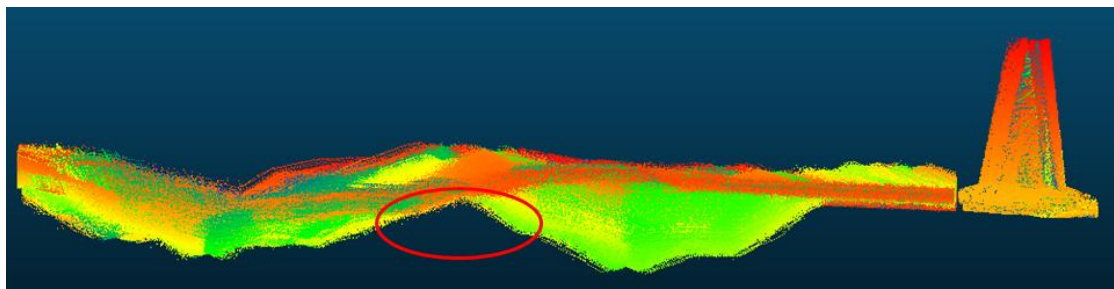


Fig. 5.1-2 上図 Fig.5.1-1 の掘削時の油圧ショベル関節軌跡と第4章で求められた土砂モデル係数 ( $D=5[\text{mm}]$ 、 $\varphi=21[\text{deg}]$ 、 $R=11.06[\text{cm}]$ 、 $F=6.1$ ) を用いてシミュレーションを行った掘削地形

ことで、この実験の際に顕在化したことである。すなわち、動きが遅い場合には、掘削により発生する土砂粒子の発生が少ないはずであるが、さらに動きが極めて遅い場合でも明らかに多量の土砂粒子が発生していることがシミュレーション中に観察された。このことは、シミュレータのソフトウェアのバグである可能性が高い。

- ② これまで述べてきた **Mean Distance** の計算では、シミュレーションを行った際に得た3次元点群の地形を構成する点の数と、実際の掘削地形を表現する3次元点群の個数についての考慮は行っていなかった。しかし、両者の点群の単位体積当たりの点の個数はほぼ等しくなるようにするほうが、**Mean Distance** を求める際の点群間距離の分布が適正になる可能性がある。
- ③ 実際の掘削地形の座標系と、シミュレーションにより得られた点群の座標系との間の座標変換を得るために、三角コーンの近傍のみで位置合わせ (ICP) を行ったが、この位置合わせによる座標変換に対して、特に座標の基底方向の誤差を生む可能性があり、このことに関する検討が必要である。

以上の3つの論点のうち、①については、共同研究の情報交換の場で共有され、シミュレータの改善を行っていただいた。この改善の後に、②および③についての検討を行

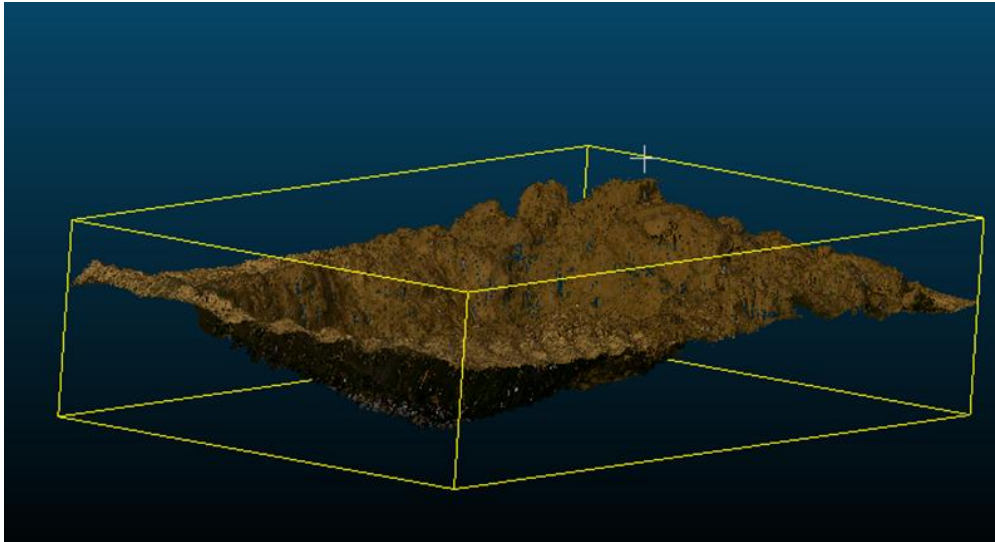


Fig. 5.1-3 実際の掘削地形（点群間引き前）

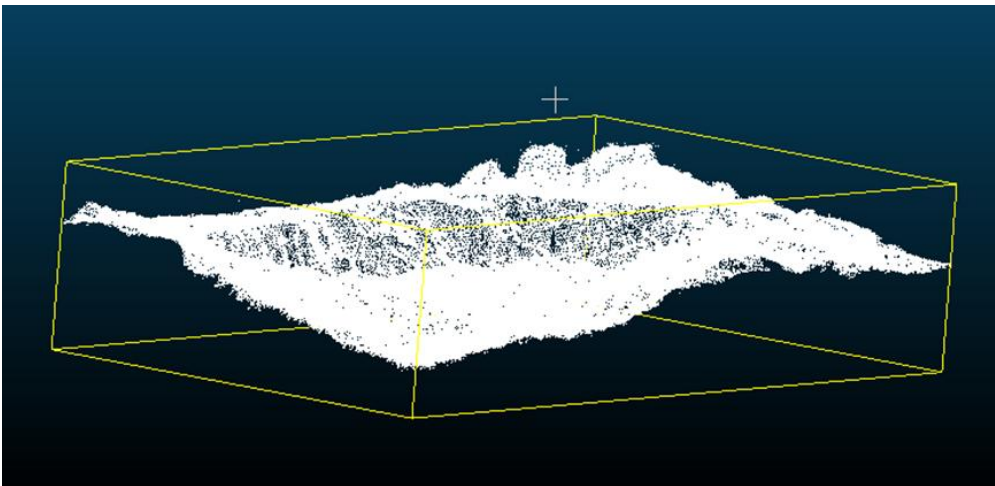


Fig. 5.1-4 実際の掘削地形（点群間引き後）

った。②については、点群の密度を現実の掘削地形による3次元点群データとシミュレータで得られた3次元点群データにおいて点群密度を合わせるため間引きを行った。実際には、1[cm]立方のボクセル内の点群を構成する3次元点の $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標の平均値を求め、これを、点群を構成する点として点群データを間引きした。Fig. 5.1-3 と Fig. 5.1-4 に実際の掘削地形の点群の間引き前と間引き後の様子を示す。

## 5.2. 三角コーン近傍のみで位置合わせ ICP を行うことについての問題

前節の③について、シミュレータ内の環境に置いた三角コーンは、そのコーンの中心軸が鉛直上方に向かって設置される一方、実際の環境に置かれたコーンは、注意深く設置したとしても、地表の凹凸影響をうけてその中心軸が正確に鉛直上方に向くように設

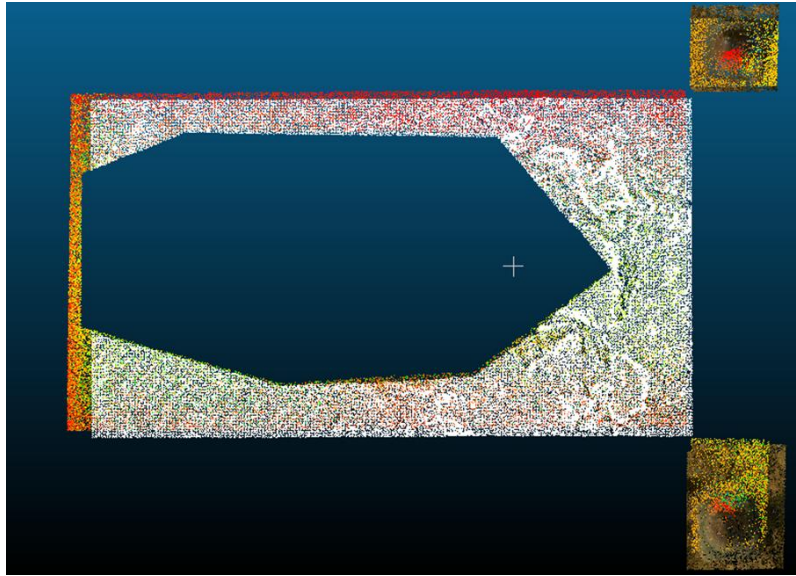


Fig. 5.2-1 三角コーンの近傍での位置合わせ（図右側）と掘削領域以外の平坦地面を表示した掘削場所周辺の実地形（色付き点群）とシミュレータ内で生成した地形（白い点群）の重ね合わせ

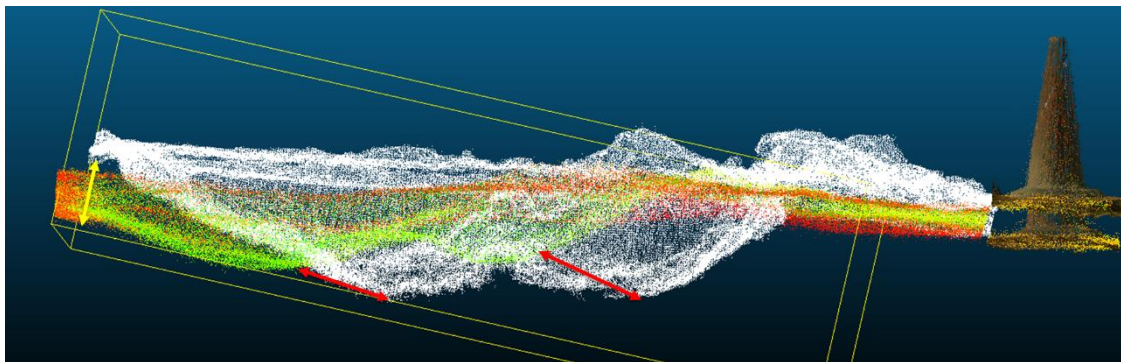


Fig. 5.2-2 実際に掘削した地形（白い点群）とシミュレータで生成した地形（色付きの点群）

置することは難しいと考えられる。その影響が顕著になる例も発見したので、ここに報告しておく。Fig. 5.2-1 は、ある時の実際の掘削地形とシミュレータ内で生成した掘削地形をコーン近傍の領域だけを用いて ICP を行って位置合わせをしたものである。さらにその状態で、三角コーンの近傍領域ではなく、掘削した領域でもない領域（Fig. 5.2-1 で白く見える長方形の領域）に注目した。この領域は、掘削地面以外の平坦な場所であり、本来はこの領域は実際の掘削領域とシミュレータ内で生成した対応する領域とがほぼ同じ面で重ならなくてはならない領域である。しかし、これを水平方向から俯瞰した Fig. 5.2-2 をみると、かなりずれがあることがわかる。この例での Mean Distance は 9.9[cm] であったが、それ以上に大きなずれがあるように観察される。一方で、実際の掘削地面（白い点群）に二つの底（赤い両矢印の下側）と、シミュレータで生成した掘削地形（色付きの点群）でもこの二つの底（赤い両矢印の上側）が再現されていることが観察でき

る。さらにこの図の左端は上下に一致していないことも観察される。すなわち、シミュレータによる掘削地形そのものの再現性はあるにもかかわらず、三角コーンの近傍で局所的な ICP を行って得ている、実際の掘削地形の座標系とシミュレータで生成した地形の座標系の座標変換の間の座標変換の誤差の悪影響が出ていると判断できる。この誤差により掘削地形そのものの類似性が、Mean Distance の比較で評価できない状況になっていると解釈できた。

実際に掘削した地形を表現する座標系と、それとは独立に行われるシミュレーションにより得られた地形を表現する座標系との間の関連付けを行わなくては Mean Distance を求めることができない。そのために相互の座標系の位置関係を定める座標変換を求める必要があり、その変換のよりどころとして物理的に同一の形状を持つものをランドマークとして位置合わせを行えばよいとする発想から三角コーンの利用を思いついた。しかし、実際に設置した三角コーンの姿勢まで、シミュレータ内で再現できるとは限らないことが、この実験からも明らかになったともいえる。したがって、本題の位置合わせについては、まだ考慮の余地があるといえる。

### 5.3. 掘削地形のみの位置あわせによる評価

前節で述べた課題を勘案し、5.1 節で述べた①への対応が済んだシミュレータを用い、掘削地形そのものの周辺だけで ICP を行ない、その ICP の評価値で掘削形状の類似性を調べる方針をとった。ただし、ICP の評価値は、本報告で述べてきた Mean Distance と同等のものである。従って土砂モデル係数を求める際も、この ICP の評価値が土砂モデル係数の組の候補のうちで最も小さくなる組をその土砂モデル係数として同定することとした。この方針での実施報告は[22]にしているが、ここではその結果の概要を記す。

ここでは、改めて、実験環境において隣接する 3 か所で油圧ショベルによる掘削を行い、その都度、掘削地形をハンディスキャナで取得して 3 次元点群化した。同時に、油圧ショベルの各関節角の時間推移を記録した。1 つの掘削地形に対して土砂モデル係数を求め、その係数を使って他の二つの掘削地形がシミュレータ内でよく再現できるかを確認した。

Fig. 5.3-1 は、実際に掘削した 3 次元点群の一例である。中央に油圧ショベルがあり、その手前に掘削した地形があることがわかる。Fig. 5.3-2 は、掘削した地形周辺の領域を取り出して、ICP による点群の位置合わせをした結果である。赤い点群がシミュレータで生成した点群、白い点群が実際に掘削した点群である。また、この図は、もっとも適する土砂モデル係数が求められた時のものであり、 $D=5[\text{mm}]$ 、 $\varphi=21[\text{deg}]$ 、 $R=10[\text{cm}]$ 、 $F=9$  が求められている。この時の ICP による評価値 (Mean Distance 相当) は、6.5[cm]であった。これにより、残り 2 つの掘削地形のそれぞれに対して、その掘削の際の油圧ショベルの各関節の軌跡を用い、ここで求められた土砂モデル係数を適用してシミュレーションを行っている。その場合でも、それぞれの ICP による評価値は 6.5cm となり、掘削



Fig. 5.3-1 実験フィールドにおいて実際に掘削した地形

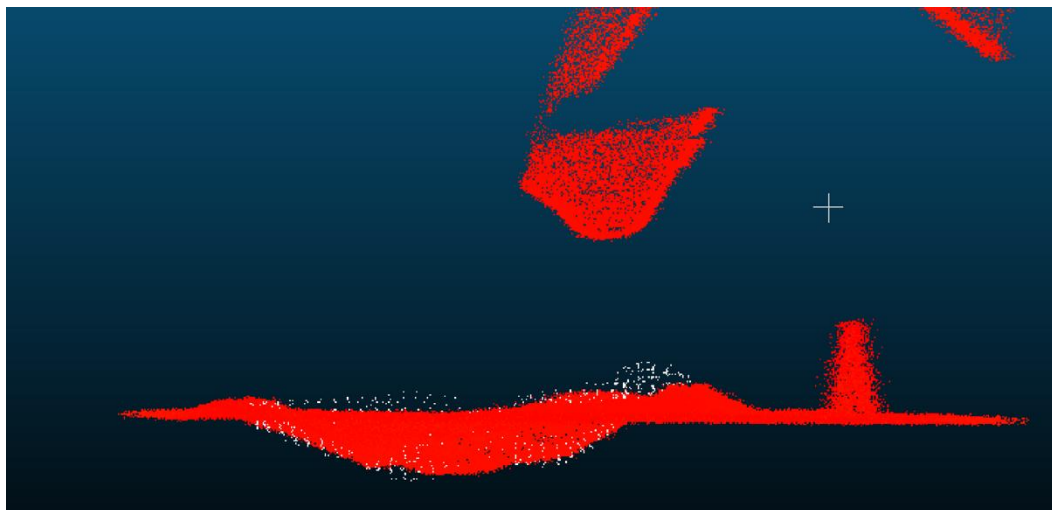


Fig. 5.3-2 シミュレータで生成された点群（赤色  $D=5[\text{mm}]$ 、 $\varphi=21[\text{deg}]$ 、 $R=10[\text{cm}]$ 、 $F=9$ ）と実際の掘削地形（白）を重ね合わせたもの。  
図の上部にあるのは油圧ショベルのバケットと作業機の一部。

地形が再現できていると考えられた。

## 6. おわりに

本研究は、掘削のオートメーション化を目指す一環として、油圧ショベルによる掘削作業の自動化に資するものである。自動的な掘削作業を積み重ねて現場で予定された出来形まで自動で施工できることは将来に達成できる技術課題として大いに期待されることである。本研究では、その現場において、まず計画された建機の一連の動作を与えて掘削シミュレーションを行い、その動作でもともと設計された地形の出来形ができるかどうかをシミュレータ内で再現できることを動機とした。

本報告では、シミュレータに OPERA を用い、油圧ショベルのバケットを平坦な地面に1度の掬い取り動作をしたときの掘削地形を再現できることを目指した。OPERA において採用されている土砂モデルでは、4種類の係数、すなわち、固着力作用距離 $D$ 、粒子半径 $R$ 、粒子間固着力 $F$ 、安息角 $\varphi$ により土砂挙動が変化する。本報告では、この4つの係数を、土木研の DX フィールドにて行った掘削試験により得られた地形と、シミュレータ内で再現される地形が類似になるよう定める方法を提案した。また、そうして決定された土砂モデル係数を用いたシミュレーションに再現性があるかどうかを調べた。

本研究において土砂モデル係数を同定するために提案した手法は、以下の通りとした。

- ① 対象となる土砂の実験場で油圧ショベルによる掘削を行い、現実環境における掘削地形を作成する
- ② 掘削地形を含む周囲の環境を3次元点群として取得する
- ③ シミュレータで油圧ショベルのモデルを用いて実機での掘削と同様の軌跡で掘削を行い、この掘削地形を含む周囲の環境を3次元点群として取得する
- ④ このシミュレータで掘削を行う際、土砂モデル係数の組を複数用意してシミュレーションを行い、土砂モデル係数の組とシミュレータの掘削地形と紐づける
- ⑤ 二つの環境下で取得した点群を共通座標系に一致させ、掘削地形周辺の点群の各々について、二つの点群の最近傍の点までの距離を計算し、その全ての点群距離の平均値 (Mean Distance) を計算する
- ⑥ 土砂モデル係数の組のなかで Mean distance が最も小さくなるものを探し、その組を適当な土砂モデル係数とする

本研究で提案した手法によりまず土砂モデル係数を求め、その土砂モデル係数によりシミュレータ内で生成できた掘削地形は、実世界の掘削地形に対して、目視上は再現されていることを確認した。また、その時の Mean Distance による評価値も得られているが、これと実用上の類似性をどこまで追い込むかについては今後の課題である。

また、土砂モデル係数を得た後、その土砂モデル係数を求めたものとは異なる掘削を

行った際、その係数によってその異なる掘削も地形を再現できるかについても検証を試みている。その過程でシミュレータに内在していたソフトウェアの不具合についても指摘できた。

その不具合が修正されたソフトウェアにより、再現性に関する実験を行っている。この実験の際、現実の掘削地形とシミュレータ内で生成された掘削地形の比較のために、両者の座標系を結び付けるための座標変換を求め、位置合わせを行う際の問題についても指摘した。5.3 節で示した結果では、第 3 章で示した三角コーンを設置した領域で位置合わせを行うのではなく、掘削地形の部分の重ね合わせで単に ICP で行う方法を採用したが、これにより再現性の評価もできる可能性を示唆している。

今後は、様々な作業環境において、本研究で示した方法が有効であるかを調べる課題が残っている。また、土砂モデル係数の求める際の、各係数の探索の手法についても、総当たりではなく、数理的な手法を実装することも求められる。

## 7. 研究成果

### 発表論文リスト

- 1) 圓井雄太・松坂要佐・阿部太郎・遠藤大輔・坪内孝司・大矢晃久：油圧ショベルによる掘削地形の個別要素法を用いたシミュレーション，第22回建設ロボットシンポジウム，P1-7, 2024
- 2) 圓井雄太・松坂要佐・阿部太郎・遠藤大輔・坪内孝司・永谷圭司：建設施工シミュレータの土砂モデルのパラメータ決定手法の提案と掘削地形の再現，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会，1A2-B02, 2025

## 参考文献

- [1] 国土交通省：建設業を巡る現状と課題,  
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>, accessed January 12,2025
- [2] 国土交通省：国土交通省における i-Construction の取組,  
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>, accessed January 12, 2025
- [3] 国土交通省：i-Construction2.0 建設現場のオートメーション化,  
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>, accessed January 12, 2025
- [4] 山元弘・茂木正晴・大槻崇・柳沢雄二・野末晃・山口崇・油田信一：動作計画と制御に  
3 次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発，計測自動制御学会論文集，  
vol.48, no.8, pp.488～497, 2012
- [5] 鈴木大心・石川将人・小河哲：物理シミュレーションを活用した油圧ショベル掘削効率  
化に関する研究，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021，p. 2P2-A10  
， 2021
- [6] 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：自律施工技術基盤  
OPERA, 国立研究開発法人 土木研究所 <https://www.pwri.go.jp/team/advanced/opera.html>,  
accessed July 20, 2024
- [7] 遠藤大輔・松坂要佐・山内元貴・橋本毅：自動建設ロボット開発のためのオープンソー  
ス型物理シミュレータの研究，令和 5 年度 建設施工と建設機械シンポジウム， 2023
- [8] Cundall, P.A.・Strack, O.D.K.：A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotech-  
nique*, Vol.29, pp.47~65, 1979
- [9] Coetzee, C.J・Els, D.N.J：The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM,  
*Journal of Terramechanics*, Vol.46, pp.217~227, 2009
- [10] Utili, S.・Nova, R.：DEM analysis of bonded granular geomaterials, *International Journal  
for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1997~2031, 2008
- [11] Tsuji, T.・Nakagawa, Y.・Matsumoto, N.・Kadono, Y.・Takayama, T・Tanaka, T：3-D  
DEM  
simulation of cohesive soilpushing behavior by bulldozer blade, *Journal of Terramechanics*,  
Vol.49, pp.37-47.30, 2012
- [12] Yoshida, T.・Koizumi, T.・Tsujiuchi, N.・Jiang, Z.・Nakamoto, Y.：Dynamic analysis of an  
excavator during digging operation, *SAE International Journal of Commercial Vehicle*, Vol.6,  
No.2, pp.419-428, 2013
- [13] Gruening, T.・Kunze, G.・Katterfeld, A.：Simulating the working process of construction  
Machines, *Proceedings of 3rd International Conference Exhibition Bulk Solids Europe*. 2010
- [14] Haut, H.・Dietrich, M.・Nienhaus, K.：A MBS solution to analyze attachment kinematics  
of hydraulic excavator and other linkages, *Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference*

Multibody Dynamics Milano, 2009

- [15] 上村祥平・今西悦二郎. : 土砂の掘削挙動を考慮した剛体・油圧駆動システムの動的シミュレーション, 日本機械学会論文集, vol.84, 861号, p. 17-00468, 2018
- [16] - : 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>, accessed January 12, 2025
- [17] - : NVIDIA.DEVELOPER:PhysX, <https://developer.nvidia.com/physx-sdk>, accessed January 12, 2025
- [18] Daniel, H. • et al : Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments, ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D, 2018
- [19] Field-Robotics-Japan : Field-Robotics-Japan/UnitySensor, <https://github.com/Field-Robotics-Japan/UnitySensors>, accessed January 12, 2025
- [20] Besl, P.J. • McKay, N. D. : Method for registration of 3-d shapes, In Sensor fusion IV control paradigms and data structures, International Society for Optics and Photonics, vol. 1611, pp. 586~606, 1992
- [21] danielgm.net : CloudCompare-Open Source project, (英語版) <https://www.danielgm.net/cc/>, accessed January 12, 2025 および (日本語版) <https://unity.com/ja>, accessed January 12, 2025
- [22] 圓井雄太・松坂要佐・阿部太郎・遠藤大輔・坪内孝司・永谷圭司 : 建設施工シミュレータの土砂モデルのパラメータ決定手法の提案と掘削地形の再現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 1A2-B02, 2025