

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04287

研究課題名(和文)ホイールローダーによるまき出し作業の自律施工システムの開発

研究課題名(英文)Development of autonomous construction system of scattering work by wheel loader

研究代表者

今西 悦二郎 (Imanishi, Etsujiro)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00804600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチボディダイナミクスとDEMを連成させることによって、土砂の掘削および走行を考慮したまき出し作業時のホイールローダー車両のダイナミクス解析技術を開発した。本技術を用いることによって、まき出し作業時のホイールローダー挙動を明らかにし、まき出し作業の自律施工のための基礎的なバケット高さの制御方法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DEMを用いた土砂反力を解析した経験に加え、マルチボディダイナミクス(多リンク機構を有するシステムの動力学解析手法)と連成させることによって、排土作業を考慮したホイールローダー車両のダイナミクス解析技術を新たに確立する。本技術を用いることによって、排土作業時のホイールローダー挙動を明らかにし、まき出し可能な排土板高さを解明する。この結果をホイールローダーロボット(まき出し作業の自律施工システムを搭載したホイールローダー)による、まき出し作業の自律施工システムに活用することによって、自律施工が可能であることを明らかにする。

研究成果の概要(英文)：This paper presents a dynamics simulation technique of the scattering operation for the wheel loader taking into consideration of both digging the soil and travelling on the soil, in which the multibody dynamics analysis is coupled with the Discrete Element Method (DEM). The dynamic behavior of the wheel loader in the scattering operation is demonstrated by using this technique, and the basic control technique of the bucket is presented for the autonomous scattering operation of the wheel loader. It is presented that the scattering operation is successfully conducted by controlling the bucket height according to the height of the soil pile. This analysis is useful for the autonomous scattering operation of the wheel loader.

研究分野：マルチボディダイナミクス

キーワード：マルチボディダイナミクス DEM まき出し作業 自律施工 ホイールローダー

1. 研究開始当初の背景

ホイールローダーによってまき出し作業を行う場合、車体の駆動力に限界があり、土砂山が高いと停止してしまう恐れがある。現状では、運転員が土砂山の高さや形状を判断し、ホイールローダーの排土板高さを調整している。ところが、自動運転を行う場合には、排土板に作用する力をリアルタイムに推定できないため、自律的な制御が困難であり、自動運転の支障となっている。

2. 研究の目的

本研究では、レーザーによって土砂山の高さや形状を計測し、計測結果と DEM 解析から、まき出し作業が可能な排土板高さを解明する。この結果をホイールローダーロボットによる、まき出し作業の自律施工システムに活用することによって、まき出し作業の自律施工が可能であることを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) DEM による土砂のモデル化

個別要素法 (以下 DEM と呼ぶ) は、粒状体の研究に用いられた離散化モデルである。個々の粒子に対するニュートン・オイラーの運動方程式を解くことによって、全ての粒子の運動を解析することができる。図 1(a)に示すように、粒子 i が粒子 j と接触している状態を考える。基準枠として、 O -XYZ からなる慣性基準枠を考える。慣性基準枠から見た粒子 i の位置を \mathbf{r}^{oi} とし、慣性基準枠の成分を \mathbf{r}^{oi} とすれば、粒子 i の並進方向および回転方向の運動方程式は、それぞれ式(1), (2)によって与えられる。

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}^{oi} = \sum_j \mathbf{f}^{ij} + \mathbf{f}^g \quad (1)$$

$$I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}^i = \sum_j \mathbf{t}^{ij} \quad (2)$$

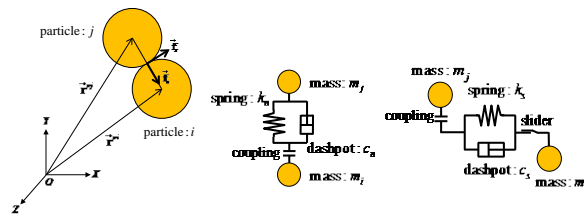


図 1 個別要素法による粒子のモデル化

(2) ホイールローダーによる土砂のまき出し作業の解析

ホイールローダーの車両モデルは、マルチボディダイナミクス (以下、MBD と呼ぶ) を用いて定式化を行う。図 2 に示すような三つの剛体からなる 2 次元モデルを考える。基準枠として O -XY からなる全体基準枠と、ボディ 1 の重心 G_1 に取り付けられた物体固定枠 G_1 - $\xi_1\eta_1$ を考える。ボディ 1 はタイヤを含む車両である。ボディ 2 はボディ 1 の点 P_1 にピン

ジョイントで結合されアームである。ボディ 3 はアームの先端点 P_2 に取り付けられたバケットである。

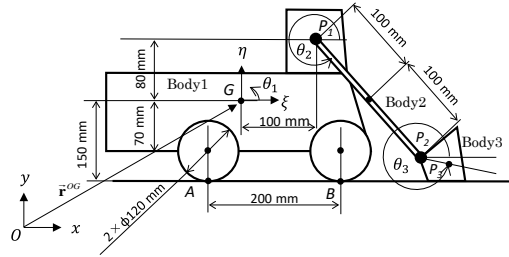


図 2 ホイールローダー車両の数学モデル

運動方程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}^G + \mathbf{Q}^A \quad (4)$$

となる。ここで、 $\mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda}$ は、それぞれ拘束条件式のヤコビアン行列、ラグランジュ未定定数である。 \mathbf{M} は質量マトリックスである。 \mathbf{Q}^A は重力、駆動力、走行抵抗力による一般化力である。拘束条件式を時間で 2 回微分し、変数を $[\ddot{\mathbf{q}}^T \ \boldsymbol{\lambda}^T]^T$ に拡大すると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^G + \mathbf{Q}^A \\ \hat{\boldsymbol{\gamma}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\gamma}} &= \boldsymbol{\gamma} - 2\alpha(\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_t) - \beta^2 \mathbf{C} \\ \boldsymbol{\gamma} &= -\frac{d\mathbf{C}_q}{dt} \dot{\mathbf{q}} - \frac{d\mathbf{C}_t}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

であり、係数 α, β はバウムガルテ安定化法の係数である。係数 α, β は拘束による挙動が自然なものとなるように $\alpha = \beta = 10$ と設定した。これらの値は単独の MBD 解析と同一の値を使用した。時間積分は、シンプレクティック・オイラー法を用いる。

ホイールローダーによる土砂のまき出し作業は、図 3 に示すように、ホイールローダー前方にある土砂山をバケットによって押し出し、土砂を平坦にする作業である。

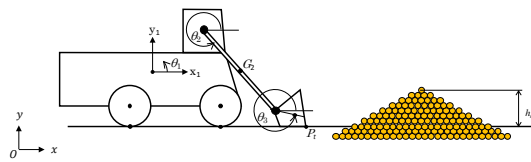


図3 ホイールローダーによる土砂のまき出し作業のモデル図

次に、土砂山高さ h_m を変化させ、20s 時のホイールローダーの走行距離 Δx_1 を計算した。その結果を図4に示す。土砂山高さ h_m が70mmまでは、走行距離は僅かに減少するが、土砂山をまき出すことができていることがわかる。一方、土砂山高さ h_m が80mmを超えると、走行距離が大幅に減少することがわかる。

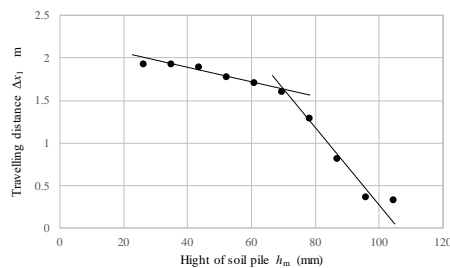


図4 土砂山高さ h_m 変化によるホイールローダーの走行距離 Δx_1 の計算結果

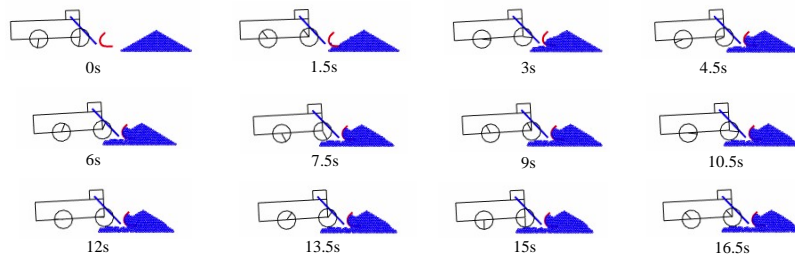


図5 土砂山高さ $h_m = 95\text{mm}$ としときの挙動図

そのため、土砂山高さ h_m が $h_m = 95\text{mm}$ の場合に、土砂山の頂上からバケット先端までの高さ h_t を $h_t = 61\text{mm}$ となるようにアーム角度 θ_2 を調整した。バケットに作用する反力の平均値は50N以下となっており、駆動力が上回っているため、土砂山を乗り越えながら、問題なくまき出し作業が行われていることがわかる。

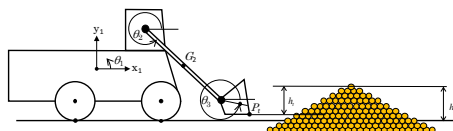


図18 アーム角度 θ_2 の制御

4. 研究成果

ホイールローダー車両によるまき出し作業時のダイナミクス性能を解析するために、土

砂山を個別要素法(DEM)によってモデル化し、基礎的な実験結果と比較した。また、ホイールローダー車両を、マルチボディダイナミクス(MBD)を用いて定式化し、DEMとの連成解析を行うことによって、ホイールローダー車両による土砂山のまき出し作業時のダイナミクス解析技術を開発し、まき出し作業時のホイールローダー挙動解析を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) ホイールローダーのバケットによる土砂掘削実験を行い、DEMの計算結果と比較したところ、良好に一致することを確認した。
- (2) 本解析技術を用いたまき出し作業時の解析結果から、土砂山の高さが低い場合には、問題なくまき出し作業が行えるが、土砂山が高くなるとホイールローダーの移動距離が減少していくことがわかった。
- (3) まき出し作業が可能な土砂山の高さを設定し、その高さに応じてバケット高さを調整することによって、問題なくまき出し作業が行えることを確認した。

5. 主な発表論文等

[論文] (計 1 件)

天内流星, 竹囲年延, 今西悦二郎, 土砂の挙動を考慮したホイールローダーまき出し作業の解析, 日本機械学会論文集, 86-891, 2020, pp.1-14,

[学会発表] (計 1 件)

天内流星, 竹囲年延, 今西悦二郎, 土砂の挙動を考慮したホイールローダーまき出し作業の解析, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.19-13, 2019, 503.

6. 研究組織

(1)研究代表者

今西 悦二郎 (IMANISHI ETSUJIRO)

弘前大学 理工学研究科 教授

研究者番号：00804600

(2)研究分担者

竹囲 年延 (TAKEI TOSHINOBU)

弘前大学 理工学研究科 助教

研究者番号：60517712

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 天内 流星, 竹田 年延, 今西 悦二郎	4. 巻 Vol.86, No.891
2. 論文標題 土砂の挙動を考慮したホイールロードまき出し作業の解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 天内 流星, 竹田 年延, 今西 悦二郎
2. 発表標題 土砂の挙動を考慮したホイールロードまき出し作業の解析
3. 学会等名 日本機械学会D&D2019講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天内 流星, 竹田 年延, 今西 悦二郎
2. 発表標題 土砂の挙動を考慮したホイールロードまき出し作業の解析
3. 学会等名 日本機械学会D&D2019講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹田 年延 (Takei Toshinobu) (60517712)	弘前大学・理工学研究科・助教 (11101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------