## 5. 無人化施工におけるブルドーザ土工のインフォグラフィックス

株式会社まざらん	○ 西垣	重臣
株式会社熊谷組	北原	成郎
株式会社キック	才原	勝敏

### 1. 動機

無人化施工において,オペレータは自らが遠隔 操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などの 物理的手がかり情報を体感することができない. 働き手(オペレータと現場技術者)の状況認識の 向上を図るために、その物理的手がかり情報をイ ンフォグラフィックスとして作成して、働き手に リアルタイムに提供する研究を行っている. イン フォグラフィックスとはデータと情報,そしてグ ラフィックの混合表現である.本論文は、無人化 施工において、土工状況の把握が難しいブルドー ザ土工に焦点を当て、インフォグラフィックス(実 稼働時間、ピッチタイム、押土転圧面積などの生 産性情報, 走行速さ, 方向転換の曲率半径, 衝撃, 自由落下,車体姿勢などに係る危険の早期警告と 危険発生箇所,走行接地圧分布,走行路面変位と 地中応力の経時変化などの品質情報)の作成手順, そして作成事例について報告する. つぎに、ブル ドーザによる転圧効果の簡易的な判断方法のアイ デアを示す. 最後に、今後の課題について述べる.

# インフォグラフィクスと現況 (as-built) 管制 現況 (as-built) 管制

ブルドーザによる土工(押土敷き均し,転圧)品 質に関わるインフォグラフィックスを,簡易的な 計測装置を用いて,現場管理者とオペレータに提 供する.そして,図-1に示す管制フローの高度化 と土工品質の向上を図る.



ブルドーザによる土工状況特性要因図を図-2 に示す.



図-2 ブルドーザによる土工状況特性要因図

## 2.2 インフォグラフィックス

インフォグラフィックス作成のための情報処理 シーケンス図を図-x3に示す.



図-3 インフォグラフィックス作成のための 情報処理シーケンス

ブルドーザによる押土・敷き均し,転圧などに 関わるインフォグラフィックスの種類をつぎに示 す.

- (1) 日常 KPI
  - 1) 撒き出し土量(m3)
  - 2) 押土作業時間(hr)
  - 3) ピッチタイム(hr/m3)
  - 4) 作業時間表
  - 5) 進捗率ゲージ

- 6) 車体姿勢の推移グラフ
- (2) 走行速度の基本情報(時系列グラフ,ヒスト グラム,記述統計量,歪度,尖り度)
- (3) 走行軌跡図
- (4) 三軸加速度の時系列グラフ
- (5) 三軸合成値\_零交叉率\_周波数時系列グラフ
- (6) 走行抵抗
  - 1) 衝撃・自由落下事象の発生箇所
  - 2)前後方向と左右方向の加速度の躍度の推移
     図
  - 3) サイドスリップ発生箇所
- (7) 押土面積
- (8) 転圧密度
- (9) 載荷面変位の経時変化
- (10) 地中応力の経時変化
- 2.3 押土面積と転圧密度

点密度を求めるために,カーネル密度推定を使う.

x1,x2, ...,xN~ f を確率変数の独立かつ同一な分 布に従う標本としたとき,その確率密度関数のカ ーネル密度推定は次のようになる.

$$f_{h}(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^{N} K(\frac{x - x_{i}}{h})$$
(1)

ここで, K はカーネル関数, h はバンド幅(平滑 化パラメータ)である. K としては,標準的なガ ウス関数(平均がゼロで分散が1)を採用すること が多い.

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$$
(2)

ここで、つぎの性質を満たすものとする.

$$\int K(x)dx = 1,$$

$$\int xK(x) = 0,$$

$$\int x^{2}K(x) > 0$$
(3)

図-4のイメージが示すように、カネール密度関数 は、ヒストグラムのように標本を一定幅の箱に入 れて数えるのではなく、カネール密度関数から決 定されたコブを各標本に与えるものとみることが でき、「コブの総和」によって推定が形成される.



図-4 カーネル関数から決定されたコブを各標本に与え るイメージ

この関数を二次元に拡張したものが、二次元カネール密度 関数である.

カーネル密度関数を計算するときのバンド幅を計算する. 計算法はつぎの式による.ここでのパラメータ値は rule of thumb に基づく,つぎのコードにより得る<sup>1)</sup>. function(x)

{

r <- quantile(x, c(0.25, 0.75))

- h <- (r[2] r[1])/1.34
- $4 * 1.06 * \min(sqrt(var(x)), h) * length(x)^{(-1/5)}$
- } ここで,quantile():四分位数を求める関数,r[1]は第1四

分位数, r[2]は第3四分位数である

押土面積と転圧密度を求める手順をつぎに示す.

手順1:緯度,経度をUTM座標系に変換し,m単位 とする.

手順 2: ブルドーザの接地圧(kgf/cm2)を使用して 力積を計算する.

手順3:力積を重みとしてカーネル密度推定法により, 点密度とその等値線を求める.

手順4: 点密度の90%, 60%, 30%などの信頼区間を その面積を求める.

手順5:押土面積と目標面積で除すことで,進捗率 を求める.

手順6:等値線,信頼区間線を描画する.

2.4 載荷面変位の経時変化

施工平坦性を示す指標として,押土・敷き均し による通過後の路面形状の変位を算出する.

この変位の算出に指して, Kelvin-Voigt model を 用いろ.ここで、つぎに示す作業仮設を置く.

(1) 地盤の勾配は少なくともブルドーザの履帯長, 範囲内は一定である.

(2) 地盤の形状は,履板戴荷後,履板が離れるまで 変化しない.

(3) 振動モデルは Kelvin-Voigt model である.

(4) ブルドーザのサスペンション(キャブダンパー マウントや積層板ダンパー)の振動は低周波であ る.

(5) 接触力(contact force)は履板を通じて等分布荷 重として地盤へ伝わる.

(6) 対象とする地盤は等方均質弾性体である.

(7) 土中応力は Steinbrenner の応力解に従う.

鉛直加速度は路面の凸凹や轍だけでなく、カン ト,縦断勾配など、並びに走行速度の影響を受け る.そこで、三軸加速度の合成ベクトルである三 軸合成値を用いる.三軸合成値は次式で得られる.

force = 
$$\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2}$$
 (4)

ここで, force : 三軸合成値,  $\alpha_{_{X}}$  : 左右方向加速度,

 $oldsymbol{lpha}_{y}$ :前後方向加速度, $oldsymbol{lpha}_{z}$ :上下方向加速度である

静的変位として、ブルドーザのスマートフォン 設置地上高を用いる.

kelvin-Voigt model の運動方程式と過渡項と定常 項の式を以下に示す

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \tag{5}$$

$$\ddot{x} + 2\zeta \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t = x_{st} \omega_0^2 \sin \omega t$$
(6)

ここで m:質量, x:バネ上質量の高さ, xst:初 期静的変位(自重による静的変位),  $\zeta$ :減衰比 (damping factor,  $\omega$ 0:不減衰固有角振動数 (natural angular frequency),  $\omega$ :角振動数(駆動 周波数 driving frequency), FOsin $\omega$ t:周期的な強 制外力などである.

過渡項(transient vibration)は,静的変位を与え, 急に開放した後に発生する自由減衰振動である.

$$\zeta < 1 \text{ Observed} \xi$$

$$y(t) = \exp(-\xi \omega_0 t) \frac{v}{\omega} \sin \omega t$$
(7)

ただし, v: 初速度である. ここでは走行速度の平 均値を用いる.

定常項 (steady-state vibratin)は, 過渡応答が消滅 した以後にも, 定常的に発生する強制振動である <sup>2)3)</sup>.

$$y(t) = A\sin(\omega t - \phi) \tag{8}$$

$$A = \frac{mr}{M+m} \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\xi\lambda^2}} \qquad (9)$$

$$\tan\phi = \frac{2\xi\lambda}{1-\lambda^2} \tag{10}$$

パラメータ間につぎの関係がある.

$$C_c = 2\sqrt{mk} \tag{11}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{12}$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{13}$$

$$\lambda = \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{14}$$

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk}} = \frac{C}{C_c} \tag{15}$$

$$x_{st} = \frac{F_0}{k} \tag{16}$$

ここで、y:振動振幅、M:振動ローラの機械質量 [kg]、m:ローラの質点、k:ばね定数(suspension stiffness)[N/m]、C 粘性減衰係数(viscous damping coeffient)[Ns/m]、C<sub>c</sub>:臨界粘性減衰係数(critical viscous damping factor、r:ローラの半径、y:振動 ローラの振動変位(上向きを正とする)、y0:振動振 幅、 $\varphi$ :位相、 $\zeta$ :減衰比、 $\omega$ 0:不減衰固有角振動数 (natural angular frequency)、 $\omega$ :角振動数(駆動周波 数 driving frequency)などである.

減衰比ζの計算について以下に述べる.対数減 衰率δと減衰比ζにはつぎの関係がある<sup>4)</sup>.

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \tag{17}$$

ここで、減衰比ζ <<1 のとき、

$$\delta \cong 2\pi\xi \tag{18}$$

とおける.

三軸合成値の波形は減衰項と定常項の重ね合わ せで形成される.ここで、減衰項の波形だけを抽 出することは困難である.

躍度は(19)式に示されるように、減衰、固有周 波数、駆動振動数と時刻の関数である<sup>5)</sup>.

$$Jerk = \omega^{2} \int_{0}^{t} f(\tau) \exp(-\zeta \omega_{0}(t-\tau)) \left[\frac{4\zeta^{2} - 3\zeta}{(1-\zeta^{2})^{3/2}} \sin \omega(t-\tau) + \frac{1-4\zeta^{2}}{1-\zeta^{2}} \cos \omega(t-\tau)\right] d\tau$$
(19)

$$f(t) = x s t \varphi^2 \sin \omega$$
 (20)

である. そこで, 三軸合成値の躍度(jerk)を求める. つぎに, この躍度の対数減衰率δを求め, (18)式を 利用して減衰比を計算する.

## 2.5 地中応力の経時変化

地中 z 深さの鉛直応力  $\sigma_z$ を次式より得る.

 $\sigma_{z}(t) = \frac{2P_{0}(t)}{\rho} \left[ \frac{2dBz(d^{2} + B^{2} + 8z^{2})}{(d^{2} + 4z^{2})(B^{2} + 4z^{2})\sqrt{d^{2} + B^{2} + 4z^{2}}} + \sin^{-1}\frac{dB}{\sqrt{d^{2} + 4z^{2}}\sqrt{B^{2} + 4z^{2}}} \right]$ 

(21)

ここで, P0(t):等分布荷重, B:転圧幅, d:接地 幅などである.等分布荷重 P0(t)は次式より得る.p として, 次式より得られる力積<sup>の</sup>を用いる.

(22) ここで,L:線圧 (linear load) [kgf/cm],v:平均走 行速度などである.

$$p_0(t) = (L + mr\omega^2)v\{1 - \exp(-\zeta\omega_0)[\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\sin\omega t + \cos\omega t]\}$$

3. ケーススタディ

阿蘇大橋地区斜面防災対策工事土留盛土工(下 段)2m 嵩上げ工事におけるブルドーザ敷均し・転 圧状況(土留盛土下段)のケーススタディについて 以下に述べる.

工現場全体状況(対岸側から撮影)を写真-1 に示 す.



写真-1 施工現場全体状況(対岸側から撮影)

土留盛土工の施工では、重機のトラフィカビリ ィティーを確保するため、基盤掘削・整正を完了 させた後、セメント固化材を使用した浅層混合処 理を行う.同処理後、工事現場外プラントで製造 した土留盛土材(改良土)を10tダンプ(有人) により場内に運搬し、クローラダンプ(無人)に 積替え所定位置まで運搬し敷設した後、ブルドー ザによる敷均し・転圧を行う.この工程を繰り返 して盛土の構築を進める.使用したブルドーザの 写真を写真-2に、諸元を図-5に示す.土留盛土工 の施工状況を写真-3に示す.

スマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている 三軸加速度計,三軸角速度計,電子コンパス計, GPS 受信器などを使用する.ブルドーザのキャビン 室内のスマートフォン取付状況を写真-4 に示す.



図-2 使用したブルドーザ(16t 級)の写真



図-5 使用したブルドーザの諸元



写真-3 ブルドーザ敷均し・転圧状況(土留盛土下段)



写真-4 スマートフォン取付状況

サンプリング周波数は,対象とする建設機械の 固有振動数を確認のうえ,100<sup>~</sup>200HZの範囲内で決 定する.

計測する変数(データ項目)は、時刻、緯度、経

度,移動方位,走行速度,x軸加速度,y軸加速度, z 軸加速度,x 軸角速度,y 軸角速度,z 軸角速度, No,電子コンパス,エリア id, x y,距離,FB(前 進停止後進カテゴリ)である.ここで,距離は建設 機械間の大円距離である.エリア id は,計測装置 が存在するエリアの識別番号(積込場,荷下場, 途中の道路など)である.

遠隔リアルタイム・ダッシュボードにアクセス することで、ブルドーザ稼動情報に係るインフォ グラフィックスをみることができる.以下に示す. 遠隔リアルタイム・ダッシュボードの初期画面を 図-6に示す.

WY OF STREET STREET		
SRANDER - CHINARE		
	作電机完成析	
デフォルトではアクセス	施工パラメータ登録	
当日年月日が表示される。 別の日に関心のある場合	センジ 先出面税	
まその日付を入力する。	データノアイル作成	
	テージ時刻表示	

図-6 ダッシュボード初期画面

初期画面の最上位のボタン「作業状況解析」を 押下すると、前述したインフォグラフィックスを 閲覧できる.インフォグラフィックスは5分間隔 で更新される.代表的なインフォグラフィックス を以下に示す.



図-7 施工軌跡

ブルドーザの作業状況(走行軌跡によるポリゴ ンズ図,押土軌跡と押土密度,作業時間表,作業 時間バーチャート,押土時走行速度記述統計,押 土時走行速度時系列グラフ,押土時走行速度ヒス トグラム,進捗ゲージなど)を表示される.



図-8 ブルドーザの作業状況





## 4.ブルドーザ転圧効果の簡易的な判断方法のア イデア

ブルドーザ転圧効果の簡易的な判断方法のアイ デアを以下に示す

地盤が軟弱なほど振動が増幅されることは良く 知られている.地中を伝わる地震波は硬い地盤ほ ど速く伝わり,軟らかい地盤ほどその速度は遅く, 1周期の間に波の進む距離(波長)が短くなる. 波長が短くなる分,振幅が増大して,エネルギー を一定に保とうとする.

そこで、三軸合成値の経時変化から周波数の変

化をみて,転圧効果を判断することを試みる. 周波数の変化を把握する簡単な方法として,零交 叉率と短時間周波数のつぎの関係を利用する.

$$shortTimeFreq = zcr * F_s / 2$$
<sup>(23)</sup>

ここで, sortTimeFreq:短時間周波数, zcr:零交叉率,  $F_s$ :サンプリング周波数などである.

三軸合成値とその零交叉率,そして対応する短時間周波数の計算例を図-11に示す.



図-11 三軸合成値とその零交叉率,そして対応 する短時間周波数の計算例

図-11 が示すように、零交叉率の経時変化データの変化点を検知することで、ブルドーザ転圧効果 を簡易的な判断が可能である.

### 5. 今後の研究課題

今後の研究課題をつぎに示す.

載荷面変位の経時変化と地中応力の経時変化の 計算と図示の機能のプログラムを現在作成中であ る.この機能をブルドーザ土工に適用し,経験と 知見を積み重ねていく.

地盤接地圧の変化と地盤の硬さについて,図-12 に示す関係があるという報告がある<sup>7)</sup>. 三軸合成 値,載荷面変位,地中応力などの経時変化から, 図-12 に示されるモードを検出できれば,より深 い考察が可能となる.計測された加速度応答値か ら,地盤接地圧モードを検出する機能を研究する.

drum motion	interaction drum- soil	mode of operation	soil contact force	application of CCC	soil stiffness	roller speed	excitation amplitude
continuous contact stronged storage and stora storage and storage storage storage storage storage storage storage storage storage storage	continuous contact	Continuous Contact	m	Ves	low	list	small
	Partial Uplift	ΛΛΛ,	710				
	periodic	Double Jump	AAAA	NO:		В	
	3	Rocking Motion	ATAT	(110			
chaotic	nun-period loss of contact	Chaotie Motion	AAA.	100	high	alow	largo

図-12 振動ローラの運転モード

#### (Modes of vibratory roller operation)

## 参考文献

1) Venables, W. N. and Ripley, B. D.: Modern Applied Statistics with S. p. 136, 2002.

On line:

http://www.bagualu.net/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/ Modern\_Applied\_Statistics\_With\_S.pdf

2) Cornelia Dobresu: The influence of the stiffness characteristics of the soil compaction parameters when using vibrating rollers, pp. 13-17, 21sr International Congress on Sound and Vibration, July, 2014,.

3) Siminiati, D., Hren, D.: Simulation on vibratory roller-soil interaction, pp. 111-120, Advanced engineering, 2, 1, ISSN 1846-5900, 2008.

4) Hamilton Cray: STRESS DISTRIBUTION IN ELASTIC SOLIDS, Research Assistant In Soil Mechanics, Graduate School of Engineering, Harvard University

5) Haoviang He, Ruifery Li, Kui Chen: Characteristics of Jerk Response Spectra for Elastics and Inelastic Systems, Hindaw Publishing Co., Shock and Vibration, 2015

6) K. A. Ismall, M. J. Strange: Impact of Viscoplastic Bodies: Dissipation and Restitution, J. Appl. Mech 75(6), 061011, 2008. On line:

http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.a spx?articleid=1474383

7) Dietmar Adam, Johannes Pistrol: Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control:State of the art overview and recent developments. On line: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\_248241.pdf