

1. バックホウ遠隔操作性向の定量的評価指標に関する研究

(株) 熊谷組 ○北原 成郎
(独) 土木研究所 藤野 健一
(株) キック 西垣 重臣

1. はじめに

バックホウの遠隔操作性に関して、建設機械の遠隔操作容易性とオペレータの遠隔操作性向という2つの視点から評価できる。本論文では、オペレータの遠隔操作性向を定量的に表現する評価指標とその活用例について報告する。ここで、遠隔操作性向とは、遠隔操作の振る舞いであり、オペレータの操作態度やスキルを示す。

2. 定量的評価指標

本研究を進めるうえでの基本的な考え方、定量的評価指標の定義とその意義について述べる。

2.1 基本的な考え方

本研究では、つぎに示す条件を満足するとき、オペレータの遠隔操作性向は優れていると仮定する。

- ①バックホウの振る舞い
 - 1) 加減速回数が少ない。
 - 2) 等速性が高い。
 - 3) エネルギー効率が良い。
 - 4) 衝撃が少ない。

②安定した意図形成

- 1) 高い学習能力
- 2) 作業環境の変化への素早い対応

この仮定に基づいて、遠隔操作性向の定量的評価指標とその活用方法を研究する。

2.2 定量的評価指標の定義

(1) 等速性評価指標

安定した動作においては、加速度計測データがその平均値を跨ぐ回数は少ないであろう。平均値交叉回数のサンプル数に対する比率を等速性評価指標とする。平均値交叉率を次式で求める。

$$mcr = \frac{1}{3(n-1)} \sum_{d=1}^3 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|\text{sgn}(x_i - \bar{x}) - \text{sgn}(x_{i-1} - \bar{x})|}{2} \quad (1)$$

ここで、 mcr : 平均値交叉率、 x_i : 速度の i 番目の観測値、 n : サンプル数、 d : 方向(左右 1, 前後 2, 上下 3)、 \bar{x} : 平均値、 sgn : 符号関数である。

平均値交叉率が小さい場合はその動作は安定

していることを示す。反対に、その値が大きい場合は、加速と減速の動作が交互に繰り返されることが多く、動作の不安定性を示す。

(2) エネルギー性評価指標

計測した加速度応答から速度ベクトルを算出し、次式より最大速度応答値の平均を計算する。

$$K = \frac{1}{3} \sum_{d=1}^3 \max V_d \quad (2)$$

ここで K : 速度応答、 d : 方向(左右 1, 前後 2, 上下 3)、 V_d : d 軸の速度集合である。

この速度応答の値が小さいとき、エネルギー効率が良い、とする。

(3) 衝撃性評価指標

躍度自乗和の平均値により衝撃性を評価する。躍度自乗和平均値を次式より求める。

$$AveJ^2 = \frac{1}{3n} \sum_{d=1}^3 \sum_{t=1}^n J_{dt}^2 \quad (3)$$

ここで、 $AveJ^2$: 躍度自乗和平均値、 $J_{dt} = \alpha_t - \alpha_{t-1}$ 、 d : 方向(左右 1, 前後 2, 上下 3)、 t : サンプル時刻である。

躍度自乗和平均値が小さいとき、その動作は衝撃が少ないと評価する。

(4) 加減速性評価指標

①加速度応答分布の歪度

歪度を次式から求める。

$$Skewness = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 / \hat{\sigma}^3 \quad (4)$$

ここで、 $Skewness$: 歪度、 x_i : 速度の i 番

目の観測値、 n : サンプル数、 \bar{x} : 平均値、 $\hat{\sigma}$: 標本標準偏差である。

②尖度

尖度はデータが平均の周辺に集中している度合いを表す尺度である。尖度を次式より求める。正規分布の尖度は3である。

$$Kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 / \sigma^4 - 3 \quad (5)$$

ここで、*Kurtosis* : 尖度, x_i : 速度の i 番目の観測値, n : サンプル数, \bar{x} : 平均値, $\hat{\sigma}$: 標本標準偏差である。

歪度や尖り度は、分布の歪み(偏り)や尖りを示す尺度である。歪度や尖り度から、加減速発生傾向が読みとれる。

(5) 走行方位制御と車体姿勢制動に関する能力評価指標

加速度応答ベクトルと速度応答ベクトルに基づいて曲率と振率を計算する。曲率を走行方位制御能力の、振率を車体姿勢制動能力の評価尺度として活用する。それぞれの第1・第3四分位数の差である四分位数範囲 (IQR: interquartile range) をバックホウの車体姿勢制動の評価尺度として採用する。四分位数範囲を採用する理由は異常値の影響を避けるためである。

四分位数範囲の値が小さい場合は、走行方位制御や車体姿勢制動に優れ、その値が大きい場合はそれが劣っていると評価する。

(6) 学習能力

オペレータは、作業回数が増えるにつれて、作業環境に慣れる。そこで、作業所要時間と試行回数の関係を次式で表現する。

$$MT = \alpha_0 + \alpha_1 Trial \quad (6)$$

ここで、 MT : 作業所要時間, $Trial$: 作業回数である。

回帰分析では、必要に応じて、目的変数と説明変数を対数化する。回帰係数の推定値は学習能力を示す。

(7) 対処能力

遠隔操作は、システムの利用者が、マウスを使用して、メニューやボタンを指示し押下する操作に類似している。そこで、システムのユーザ・インタフェース操作の困難性評価方法²⁾を参考にして、つぎに示す評価尺度により遠隔操作の困難性を表現する。

目標物が大きいほど、移動距離が長くなるほど難しくなると仮定し、次式のように、困難性指標(ID: Index of Difficulty)を、目的物の大きさと作業回数、そして目的物までの距離により表現する。

$$ID = \frac{D}{W * L * H * trial} \quad (7)$$

ここで、 W : 目標物の幅, L : 目標物の奥行き, H : 目標物の高さ, $trial$: 作業回数, D : 移動開始地点から目標物の中心までの距離を示す。

作業所要時間と困難性指標の関係を次式で表現する。

$$MT = \beta_0 + \beta_1 ID \quad (8)$$

ここで、 MT は作業所要時間を示す。

回帰分析では、必要に応じて、目的変数と説明変数を対数化する。回帰係数の推定値はオペレータの困難性に対する対処能力を示す。

3. 学習データの取得

(独) 土木研究所で実施された「遠隔操作時における操作性検証実験」において、バックホウの振る舞いに伴う加速度応答を計測した。この検証実験では、障害物を乗り越え、目標堆積土砂まで走行して、その土砂を掘削盛替えするという実験を複数回実施した。その実施状況を写真1に、検証実験実施概要を以下にそれぞれ示す。

- ① 計測場所：(独) 土木研究所実験場
- ② 実施日：2010年11月16日～2010年11月18日
- ③ 被験者：熟練オペレータ2名(高齢者と中年者)、便宜上、中年者をAと高齢者をBで表記する。
- ④ 走行距離：36m
- ⑤ 走行障害物の大きさ：2m*3m*1
- ⑥ 掘削盛替え対象物の大きさ：2m*3m*1.5m 土量 9m³
- ⑦ 実験順序と回数：A, Bの順に繰り返し実施。A：9回, B：8回。
- ⑧ 計測機器類の取り付け位置を図1に示す。

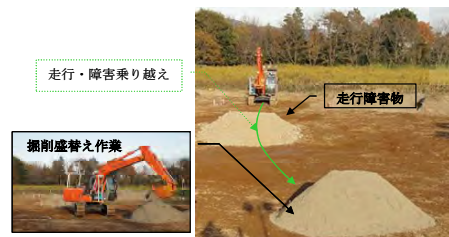


写真-1 検証実験実施状況

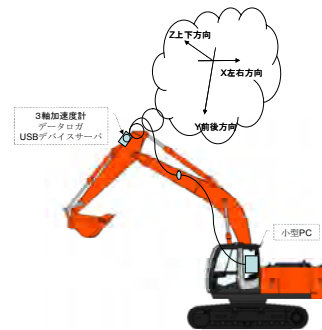


図-1 計測機器類の取り付け位置

4. 定量的評価指標の学習データへの適用

4.1 走行障害物乗り越え実験

(1) 走行障害物乗り越え状況

走行障害物乗り越え実験1回目において、Aは、

作業環境を把握できていないため、バックホウの走行方位を定めることが難しかったようである。そのため、切り替えしや前進・後退を繰り返しながら、登坂を繰り返した。一方、Bは、Aの遠隔操作状況をみていたため、大きな戸惑いはみられなかった。

いずれのオペレータも実験回数を重ねると、作業環境を把握でき、且つバックホウ履帯跡をモニタ上ではっきりと識別できるようになったため、バックホウの走行方位制御が容易になったようである。さらに、走行障害物は、バックホウ履帯によりかなり締め固められるとともに、法肩は崩れきた(写真2)。そのため、登降坂は容易になったが、降坂時に、つぎの事象が発生した。

- ①左方向にジョルティング。
- ②車体が落ち込む。



写真-2 複数回実験後の走行障害物

(2) 相関関係

走行障害物乗り越え実験の初回と最終回、それぞれの加速度応答の相関行列図とヒストグラムを図2と図3にそれぞれ示す。

AとBともに、Y軸(前後方向)とZ軸(上下方向)の加速度応答間には弱い相関関係($R \approx 0.64$)がみられる。

(3) 走行障害物乗り越え実験の定量的評価指標値

走行障害物乗り越え実験の初回と最終回の定量的評価指標の値を表1に示す。

表1の初回と最終回のそれぞれの値を比較すると、つぎのことが分かる。

- ① エネルギー性評価指標値
Aの値は小さくなったが、Bの値は大きくなっている。
- ② 等速性評価指標値
Aの値は大きくなったが、Bの値は小さくなっている。
- ③ 衝撃性評価指標値
AとBのいずれの値も小さくなっている。
- ④ 走行方位制御能力の評価指標値である曲率の値
Aの値が変化したとはいえない。Bの値は小さくなっている。
- ⑤ 車体姿勢制動能力の評価指標値である振率

の値

AとBのいずれの値も大きくなっている。

⑥ 歪度の値

AとBのx軸(左右方向)の加速度応答分布は、ほぼ左右対称の釣鐘形から右へ偏った形に変化している。

Aのy軸(前後方向)のいずれの加速度応答分布もほぼ左右対称である。加減速の傾向に大きな変化はみられない。

一方、Bのy軸(前後方向)の加速度応答分布は、右から左への偏りに変化している。

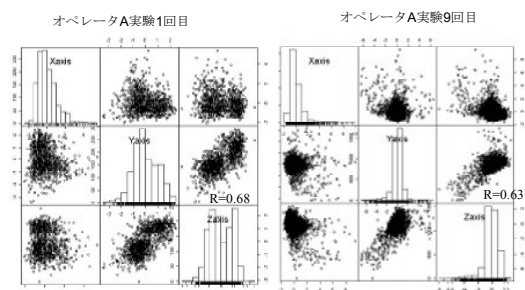


図-2 Aの相関行列図とヒストグラム

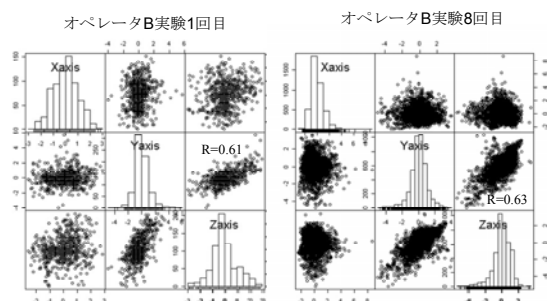


図-3 Bの相関行列図とヒストグラム

表-1 走行障害物乗り越え実験

定量的評価指標	オペレータ A		オペレータ B	
	第1回	第9回	第1回	第8回
エネルギー性	6.226	5.097	6.295	7.181
等速性	0.114	0.125	0.207	0.118
衝撃性	0.226	0.147	0.423	0.158
曲率	0.802	0.81	1.092	0.973
振率	0.018	0.158	0.06	0.085
加速度歪度	第1回	第9回	第1回	第8回
Xaxis	0.295	1.202	0.009	0.965
Yaxis	0.197	0.059	0.678	-0.538
Zaxis	-0.094	-0.02	0.144	-0.949
加速度尖り度	第1回	第9回	第1回	第8回
Xaxis	-0.39	2.243	-0.405	2.589
Yaxis	3.323	-0.25	3.124	2.382
Zaxis	0.875	-1.059	0.472	2.084

A の z 軸（上下方向）の初回の加速度応答分布には二峰性がみられる。しかし、A と B の最終回の加速度応答分布は、いずれも左への偏った形に変化している。

⑦ 尖り度の値

A と B の x 軸（左右方向）の初回の加速度応答分布は正規分布に比べてやや扁平なのに対し、最終回では非常に尖っている。

A の y 軸（前後方向）の加速度応答分布は、初回では非常に尖っていたが、最終回では正規分布に比べてやや扁平になっている。一方、B の場合は、いずれ分布も非常に尖っている。

A の z 軸（上下方向）の初回の加速度応答分布は、初回ではやや尖っていたが、最終回では非常に扁平になっている。一方、オペレータ B の場合は、やや尖りのある形が非常に尖った形に変化している。

(4) 学習能力

作業所要時間と実験回数の散布図、並びに両変数を対数化した散布図と(6)式の両辺を対数化した式を用いて求めた回帰直線を図4に示す。

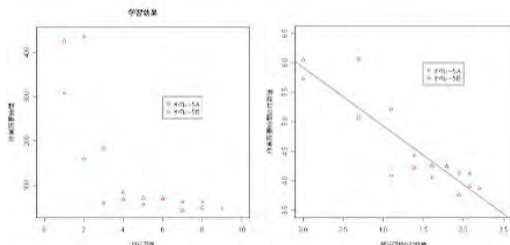


図-4 学習能力

A と B の回帰係数の推定値は有意であったが、両者には差が認められなかった。言い換えれば、A と B について学習効果はみられたが、両者の学習能力には差がみられなかった。

(5) 対処能力

作業所要時間の対数値を目的変数に、困難性指標を説明変数にした回帰分析を行った結果を図5に示す。

実験回数に比例して、走行障害物の大きさが小さくなるとともに、締め固め度も増し、登降坂が容易になる。

B の回帰直線の傾きは A のそれより大きい。これは、作業の困難性が増すにつれて、B は A より作業時間が長くなる傾向がある、ことを示す。言い換えれば、A の作業の対処能力は B のそれより優れている、といえる。

4.2 掘削盛替実験

(1) 掘削盛替実験の実施状況

掘削盛替実験の実施状況を写真3に示す。

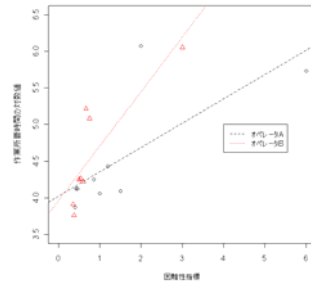


図-5 対処能力



写真-3 掘削盛替実験実施状況

前述したように、掘削盛替対象物の大きさは2m*3m*1.5m、土量は9m³である。

掘削盛替実験の初回において、Aは無理なく作業に着手したが、Bは、車体とバケットの位置決め、そして旋回角度に戸惑いがみられた。

(2) 相関関係

掘削盛替実験の初回と最終回、それぞれの加速度応答の相関行列図とヒストグラムを図6と図7にそれぞれ示す。

掘削盛替実験の初回においては、A と B ともに、Y 軸（前後方向）と Z 軸（上下方向）の加速度応答間には弱い相関関係(R≒0.55)がみられるが、最終回の実験において相関関係はみられない。

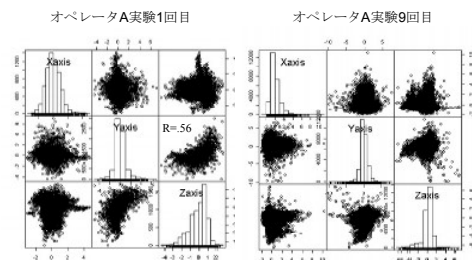


図-6 Aの相関行列図とヒストグラム

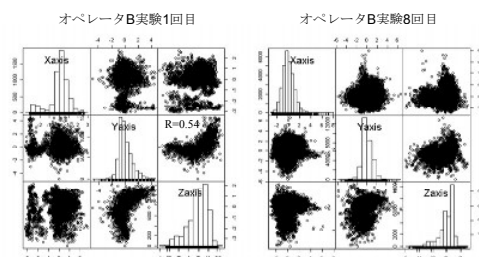


図-7 Bの相関行列図とヒストグラム

(3) 掘削盛替実験の定量的評価指標値

掘削盛替実験の初回と最終回の定量的評価指標の値を表2に示す。

表-2 掘削盛替実験

定量的 評価指標	オペレータ A		オペレータ B	
	第1回	第9回	第1回	第8回
エネルギー性	7.108	12,152	49,748	7.541
等速性	0.086	0.045	0.073	0.04
衝撃性	0.171	0.063	0.091	0.041
曲率	0.91	0.983	1.075	0.945
振率	0.043	0.043	0.008	0.056
加速度歪度	第1回	第9回	第1回	第8回
Xaxis	0.494	1.379	-1.241	0.965
Yaxis	0.65	-0.321	0.962	-0.538
Zaxis	-0.724	-1.621	-0.857	-0.949
加速度尖り度	第1回	第9回	第1回	第8回
Xaxis	0.503	3.252	1.628	2.589
Yaxis	1.568	6.503	1.863	2.382
Zaxis	-0.164	4.661	0.419	2.084

表2の初回と最終回のそれぞれの値を比較すると、つぎのことが分かる。

① エネルギー性評価指標値

いずれの値も走行障害物乗り越えのときの値より大きい。特にBの初回の値が非常に大きい。Aの値は大きくなったが、Bの値は小さくなっている。

② 等速性評価指標値

AとBのいずれの値も小さくなっている。

③ 衝撃性評価指標値

AとBのいずれの値も小さくなっている。

④ 車体制動評価指標値である曲率の値

AとBのいずれの値も大きな変化はみられない。

⑤ 車体制動評価指標値である振率の値

Aの値に変化はみられない。Bの値は小さくなっている。

⑥ 歪度の値

Aのx軸（左右方向）の加速度応答分布は、ほぼ左右対称の釣鐘形から右へ偏った形に変化している。一方、Bのそれは、二峰性の左に偏って形から右に偏った形に変化している。

AとBのy軸（前後方向）のいずれの加速度応答分布もやや右に偏った形からやや左に偏った形に変化している。

AとBのz軸（上下方向）においては、いずれも左に偏っている。オペレータAのそれは、初回に比べて最終回では左への偏りが大きくなっている。

⑦ 尖り度の値

Aのz軸（上下方向）の加速度分布は、やや扁平であった形から大きく尖った形に変化している。最終回では、AとBのいずれの方向の加速度分布も大きく尖っている。さらに、初回に比べ最終回の分布の尖りは大きくなっている。

(4) 学習能力

作業所要時間と試行回数の散布図と回帰直線を図8に示す。

AとBの回帰係数の推定値は有意であったが、両者には差が認められなかった。言い換えれば、AとBについて学習効果はみられたが、両者の学習能力には差がみられなかった。

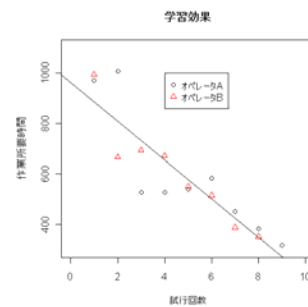


図-8 掘削盛替実験学習能力

(5) 対処能力

作業所要時間の対数値を目的変数に、困難性指標を説明変数にした回帰分析を行った結果を図9に示す。

実験回数に比例して、掘削盛替対象物の土量は減少し、作業が容易になる。

オペレータAの回帰直線は有意であったがオペレータBのそれは有意にならなかった。図9の散布状況を見ると、困難性指標と作業所要時間の対数値に相関関係がみられる、とはいえない。

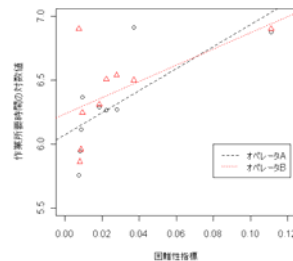


図-9 掘削盛替実験対処能力

4.3 遠隔操作性向変化の要約

これまでに述べた定量的評価値に基づいて、「AとBの遠隔操作性向が実験を通じてどのよ

うに変化したか」に関する要約を以下に示す。

- ① A (中年齢者) と B (高年齢者) には学習能力の差は無かった。
- ② A は B より対処能力が優れている。
- ③ 実験を重ねると、A と B の遠隔操作は、衝撃性は低くなった。

- ④ 左右方向の加速度に関して、実験を重ねると、A と B の操作には、小刻みな減速が多くなり、時に急加速する傾向がみられる。

掘削盛替え実験において、B の操作には、初回に二峰性がみられた。これは、車体の位置決め、旋回角度に対する戸惑いの影響を推察される。しかし、最終回では無くなっている。実験を重ねることで、旋回に慣れたものと推定される。

- ⑤ 前後方向の加速度に関して、実験を重ねると、A と B の操作には、小刻みな減速が多く、時に急加速する傾向から、小刻みな加速が多くなり、時に急減速する傾向に変化した。

- ⑥ 上下方向加速度に関して、実験を重ねると、A と B の操作には、小刻みな加速が多くなり、時に急減速する傾向がみられる。

走行障害物乗り越え実験において、A の操作には、初回に二峰性がみられた。これは、作業環境不慣れのため、バックホウの走行方位を定めることが難しかったことが影響している、と推察される。しかし、最終回では無くなっている。実験を重ねることで、作業環境に慣れ、登坂が容易になったものと推定される。

⑦ A の特徴

- 1) エネルギー性は、走行障害物乗り越え実験においては良くなったが、掘削盛替え実験においては悪くなった。
- 2) 走行障害物乗り越え実験においては、急加減速が多くなり、等速性が悪くなった。一方、掘削盛替え実験においては、急加減速はやや多くなったが、等速性は良くなった。
- 3) 走行障害物乗り越え実験においては、車体姿勢制動能力が低下した。掘削盛替え実験においては変化がみられなかった。

⑧ B の特徴

- 1) エネルギー性は、走行障害物乗り越え実験では悪くなったが、掘削盛替え実験では良くなった。
- 2) 両実験において等速性は良くなった。
- 3) 走行障害物乗り越え実験では、実験を重ねると走行方位能力は向上した。ここでは、A の後に B という実験順序の影響を

無視できない。

- 2) 掘削盛替え実験では、実験を重ねると、走行方位制御能力と車体姿勢制動能力が低下した。ここでは、B は高年齢者であることを考慮すると、疲労の影響を無視できない。

5. まとめ

本論文で提案したオペレータ遠隔操作性向の定量的評価指標は、オペレータの遠隔操作性向を理解するうえで、貴重な情報を提供する。

今後の課題をつぎに示す。

- ① 登坂路・作業床形成、除石、転石小割、排土などの作業を対象とし、遠隔操作の熟練者と未経験者、並びに高年齢者、中年齢者、若年齢者などを被験者とした操作性検証実験の実施
- ② 遠隔操作性向定量的評価指標と評価者の主観的な重みを取り入れた総合評価方法の構築
- ③ オペレータの遠隔操作技能評価、遠隔操作システムのユーザ・インタフェースの有効性評価などへの遠隔操作性向定量的評価指標の活用

本研究は、土木学会建設用ロボット委員会土木技術小委員会の活動の一つとして行ったものである。

参考文献

- 1) 北原成郎, 吉田貴, 猪原幸司, 西垣重臣: 災害応急・復旧工事での遠隔操作式建設用ロボットの作業性に関する研究, 第12回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 47-56, 2010.
- 2) S. Zhai, J. Accot, R. Woltjer: "Human Action Laws in Electronic Virtual Worlds – An Empirical Study of Path Steering Performance in VR," Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 13, No.2, pp. 113-127, 2004.