

油圧ショベルシミュレータによる操作性の考察 Study of the operability by hydraulic excavator simulator

○羽賀正和*, 藤島一雄*, 高野悟**, 猪岡光**
Masakazu Haga, Kazuo Fujishima, Satoru Takano, Hikaru Inooka

*日立建機株式会社, **東北大学
*Hitachi Construction Machinery Ltd., **Tohoku University

キーワード: 油圧ショベル (hydraulic excavator), シミュレータ (simulator),
操作性 (operability)

連絡先: 〒112-0004 東京都文京区後楽三丁目5番1号 日立建機株式会社 中型建機事業部 技術部
羽賀 正和, Tel.: (03) 3830-8101, Fax.: (03) 3830-8221, E-mail: haga82@hitachi-kenki.co.jp

1. 緒言

建設機械の中で油圧ショベルはその応用作業の多さより現在の土木作業機械の代表的作業機となっており、その作業は多岐にわたっている。

油圧ショベルの動作の中で主要部分であるフロントの動き操作性を把握するため、フロント動作のシミュレータを作成した。このシミュレータを用いてレバー操作によるフロントの操作性ならびに自動制御を加えた場合の操作性の確認を行った。

2. 油圧ショベル

2.1 構成

油圧ショベルの構成は図1の様になっている。油圧ショベルは下部走行体、上部旋回体そしてフロント部より構成され、上部旋回体は下部走行体に旋回可能に結合されている。油圧ショベルのフロントはブーム、アーム、バケットの3部材より構成されている。

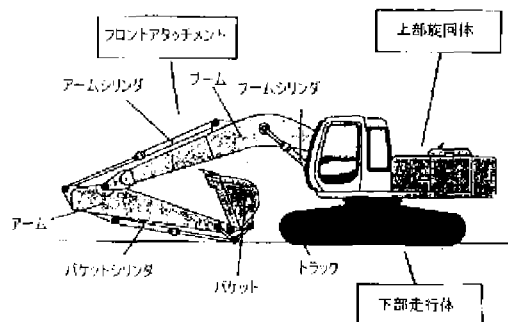


図1 油圧ショベルの構成

2.2 操作レバーの配置

操作レバーの配置を図2に示す。

各々のフロント部材は油圧シリンダにより独立して駆動される。ブーム、アーム、バケットの先端部はそれぞれピン結合部を中心に円弧動作をする。

そのため、フロント動作で掘削、あるいは均し作業を行う場合は、バケットの刃先が水平に動作する様にブーム、アームを連動させ操作する必要がある。

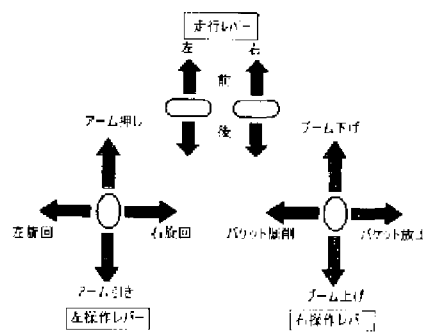


図2 操作レバー配置図

2.3 油圧回路

油圧ショベルのフロント部の油圧回路を図3に示す。フロント部材は各々油圧により駆動される。エンジンにより油圧ポンプが回転し、油圧を発生させる。その油はメインコントロールバルブにより制御され、各フロント部材を動作させるシリンダに送り込まれる。操作レバーの操作量に応じてパイロットバルブでパイロット指令圧が生じる。

この指令圧に応じてメインコントロールバルブが動作し、シリンダの圧油を制御する。

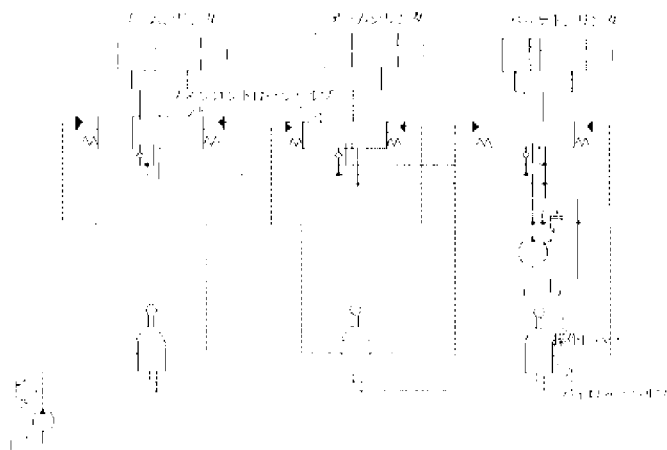


図3 油圧回路

3. 油圧ショベルシミュレータ

3.1 構成

構成を図4に示す。

操作レバーは前後左右方向に動作する電気ジョイスティックを左右2本用いた。それぞれ2軸にポテンショメータを設置されており、電圧を出力する。A/D変換にアドテック製PCIボード(a35PCI)を用いた。パソコンはDOS/Vパソコン(FMV 5133DPT)を用いた。

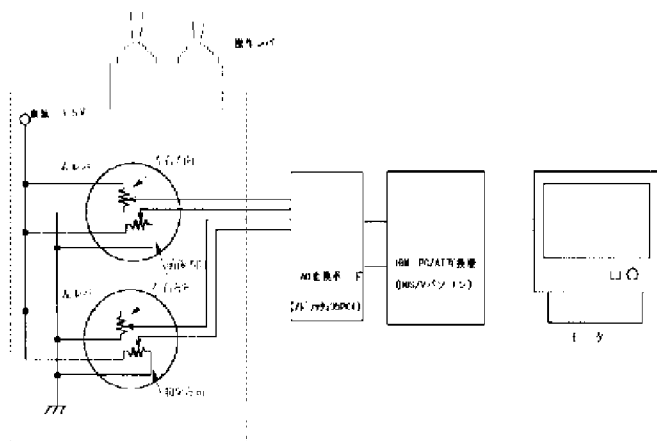


図4 シミュレータ構成図

3.2 シミュレータ画面

シミュレータ画面を図5に示す。画面右に油圧ショベルの側面図を表示する。左に油圧ショベルフロント、そして掘削面を表示する。

目標掘削面を白の直線で示した。左の茶色の部分は土を示している。土は目標掘削面より1m土まで表示している。フロントが土の表示部分を通過すると、その部分が掘れバケットが通過したかどうか分かる。

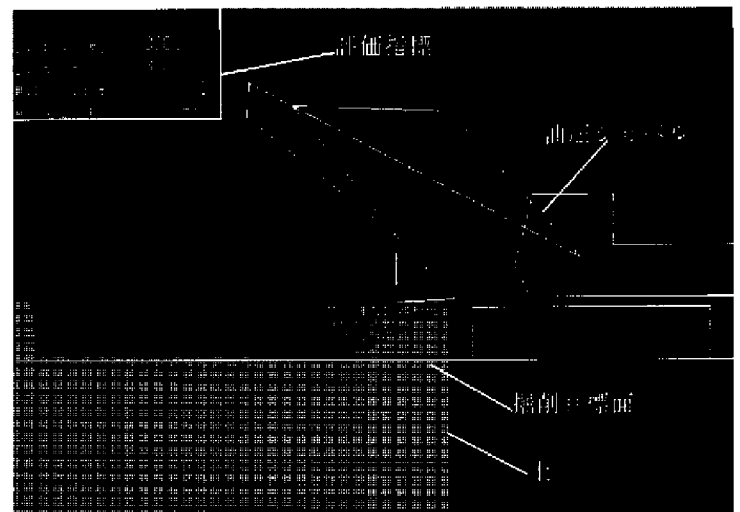


図5 シミュレータ画面

3.3 シミュレーションプログラム

図6に実機シミュレーションのフローを示す。

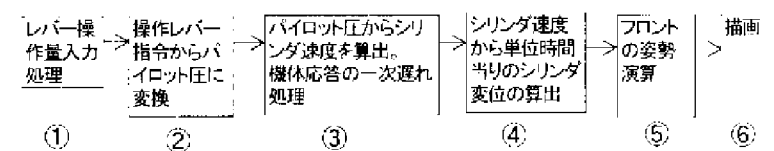


図6 シミュレーションのフロー

- ①レバー操作量に応じた操作レバー出力電圧を入力し、AD変換により操作量入力処理を行う。
- ②操作レバー操作量を油圧ショベルにおけるパイロットバルブの指令圧に変換する。
- ③パイロット圧からシリンダ速度を求める。実機においてはパイロット圧により油圧コントロールバルブを操作し、コントロールバルブで油量を調整しシリンダを動作させる。ここでは実機データを基にしパイロット圧に対応したシリンダ速度への変換をおこなう。コントロールバルブ、フロントの応答特性は一次遅れで近似した。
- ④シリンダ速度からプログラムのサイクルタイム当たりのシリンダ変位を求める。(サイクルタイム50msec)
- ⑤シリンダ変位からフロント各部材の移動後の位置を算出する。
- ⑥移動後のフロント部材の描画を行う。

4. 実験

4.1 操作手順

①プログラムのスタート

②掘削面の設定

掘削深さ、傾斜の設定を行う。掘削面の通る座標と傾きを入力する。

③掘削操作

モニタを見ながら、目標掘削面に沿った掘削操作を行う。操作パターンはアームクラウド＋ブーム上げ操作にて行う。設定面を超えずに、一回で設定面を仕上げることが目標に操作を行った。

4.2 実験結果

操作者4人により実験を行った。事前に練習を行い、操作に慣れてから実験を行った。シミュレータでは実際の掘削と違い掘削抵抗がないため簡単に目標面を行き過ぎ、掘り過ぎとなる。そのため、いずれの実験者もかなり気を遣い操作を行った。

4.2.1 手動操作、水平掘削

水平掘削作業を想定した操作を1回行い、掘削面の仕上げ状況を評価する。

掘削結果例を下記に示す。精度を重視して掘削を行った。掘削深さの誤差は実機の尺度に合わせて±10cm程度であった。



図7「手動操作、水平」の掘削結果

4.2.2 手動操作、傾斜±30度掘削

傾斜のある目標掘削面を作業の確認を行った。従来例として、バケット爪先と目標掘削面との深さの差を数字表示する方式がある。その数字表示方式に比べ、目標掘削面とバケットの位置をグラフィック表示する方式は目標面に対するバケットの位置をX、Y方向同時に確認でき、位置関係の把握が容易である。

図8、9に示す様に、傾斜の場合も水平の場合と同程度の掘削精度となった。

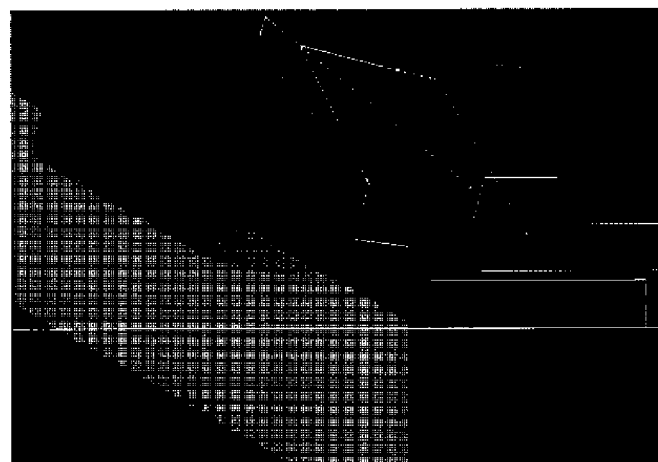


図8「手動操作、傾斜プラス30度」の掘削結果

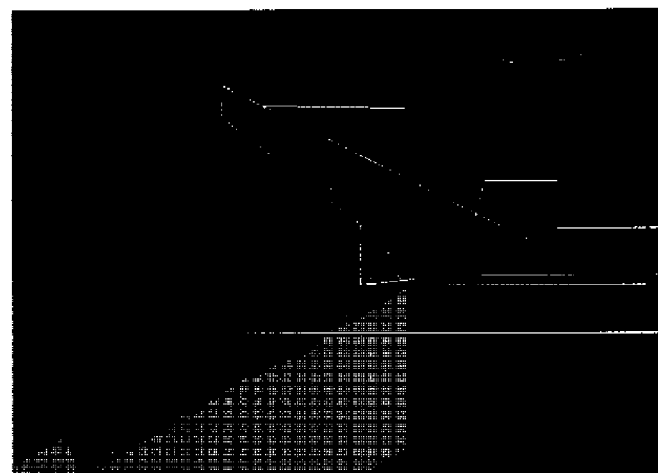


図9「手動操作、傾斜マイナス30度」の掘削結果

4.3 手動操作に減速補正

今回のシミュレーションでは土砂の掘削抵抗は考慮に入れていないが、実際の現場においては土砂の掘削抵抗によりバケットが深く食い込んだ場合は簡単には掘れない。土砂の上面に対する掘削深さが深くなるとフロントの動作速度は遅くなる。そこで実際の操作性に近づけるため、土砂上面とバケット爪先との距離に応じてフロント速度を減速する制御を行った。図10に示す減速係数Kを用いて(1)式の計算により操作量に応じた目標シリンダ速度Vを補正し減速されたシリンダ速度V_iを使用する。

$$V_i = K \times V \quad (1)$$

V：操作量に応じた目標シリンダ速度

V_i：補正後シリンダ速度

K：減速係数

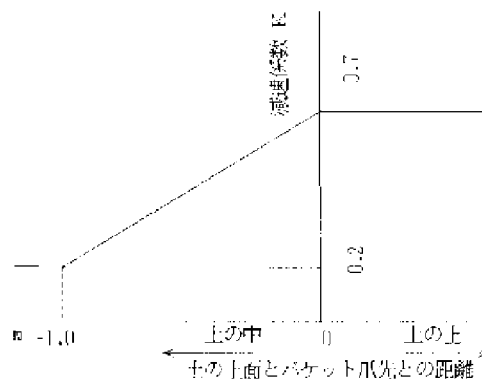


図10 バケット爪先位置に応じた減速係数

4.4 減速補正を行った場合の実験結果

減速制御を行った操作結果を図11、12、13に示す。操作者より、「減速制御なしに比べ格段に操作し易い」との評価を得た。

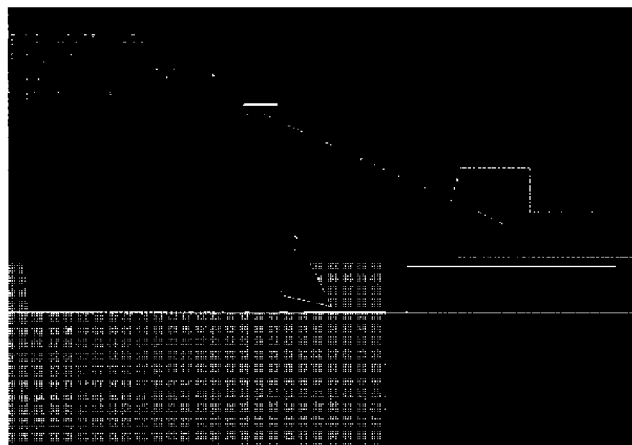


図11 「減速制御, 水平」の掘削結果

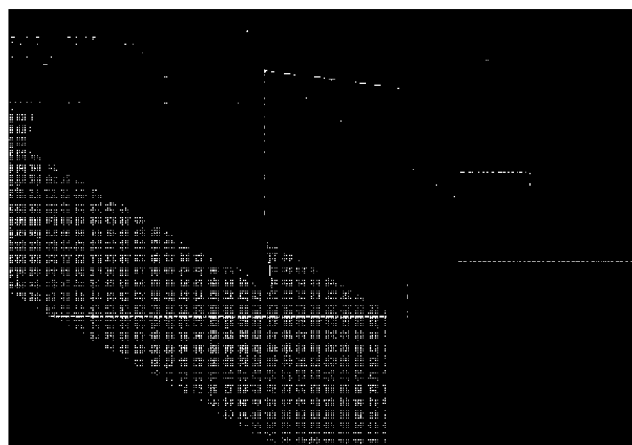


図12 「減速制御, 傾斜プラス30度」の掘削結果

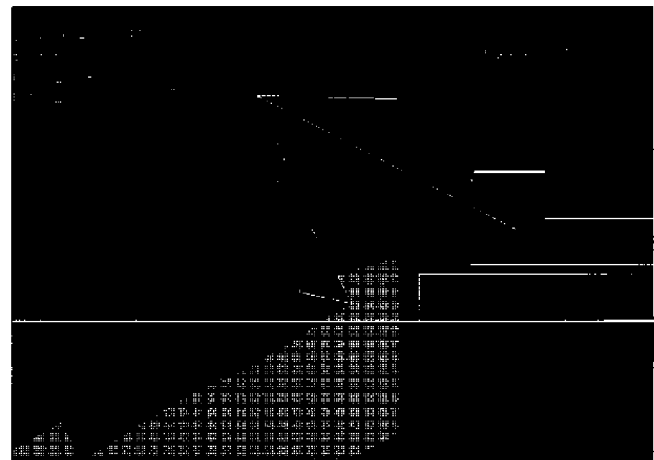


図13 「減速制御, 傾斜マイナス30度」の掘削結果

4.5 掘削精度の評価指標

掘削精度を数値化するため以下の指標を用いた。

- ・設定面に対するバケット爪先の位置がY軸方向プラスの場合

plus_max…ずれのMAX値 (cm)

plus_integ…ずれ量をX方向に積分した値 (掘り残し面積, cm^2)

- ・設定面に対するバケット爪先の位置がY軸方向マイナスの場合

minus_min…ずれのMIN値 (cm)

minus_integ…ずれ量をX方向に積分した値 (掘り過ぎ面積, cm^2)

4.5.1 「減速制御, 水平掘削」の評価指標

操作者A, B, C, Dの結果をそれぞれ図14、15、16、17に示す。

図14において横軸は操作の回数を示し、縦軸が各指標の値を示す。

結果を見ると各操作者共に、plus_maxは100程度、minus_minは5程度であった。目標掘削面を超えない様に意識して操作を行うため、少し上方にずれた結果となったと考えられる。

plus_integも各操作者共に同じ傾向を示し2000前後の値となっている。

一方、minus_integは操作者の特徴が現れている。操作者A, Bは100~200の範囲に入っており、掘り過ぎの部分が極めて少ないのに対し、操作者Cは430~850であり、掘り過ぎの部分が大きい。

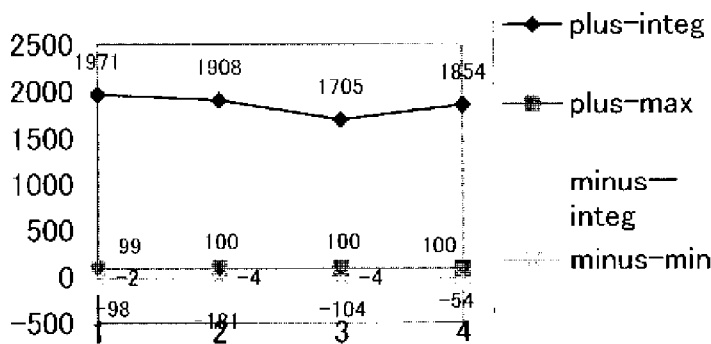


図14 「減速制御, 水平, 操作者A」の評価指標

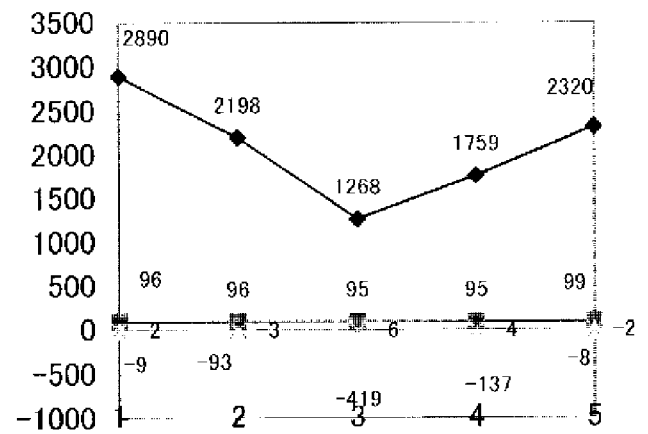


図17 「減速制御, 水平, 操作者D」の評価指標

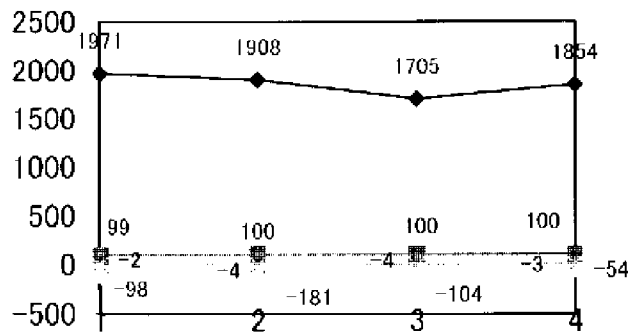


図15 「減速制御, 水平, 操作者B」の評価指標

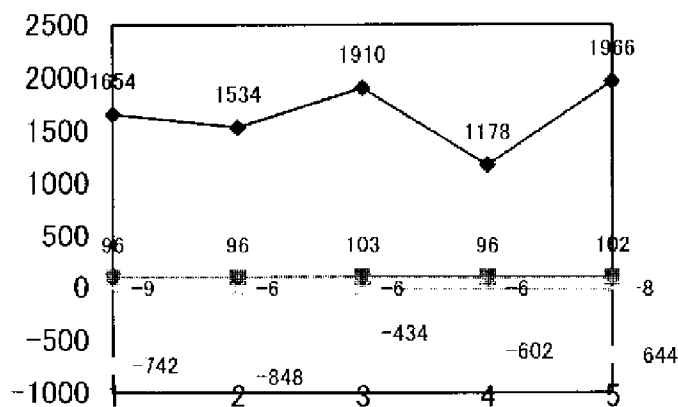


図16 「減速制御, 水平, 操作者C」の評価指標

4.5.2 「減速制御, 傾斜プラス30度掘削」の評価指標

減速制御を加えて、傾斜30度の斜面を掘削した場合の結果を図18、19に示す。

minus integの値が小さく、掘り過ぎが極めて少ない結果となった。

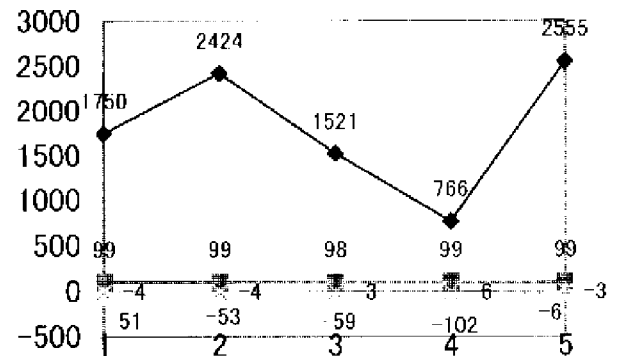


図18 減速制御, 傾斜プラス30度, 操作者B

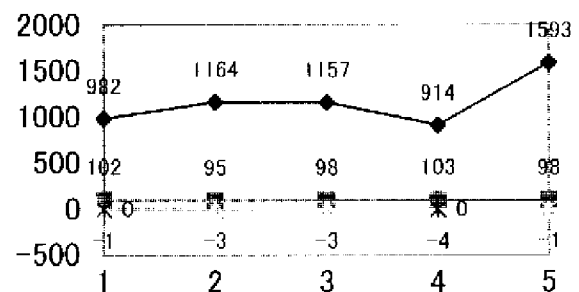


図19 減速制御, 傾斜プラス30度, 操作者D

4.5.3 「減速制御, 傾斜マイナス30度掘削」の評価指標

操作者B, Dは同じ傾向を示している。minus_integが小さく掘り過ぎが小さい。plus_integは3000~4000を示し、掘残し部分が多い。一方、操作者Cはminus_integが多く、水平の場合と同様に掘り過ぎの部分が多い傾向を示している。

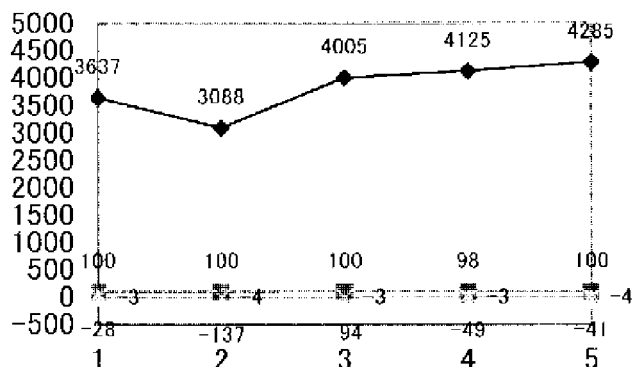


図20 減速, 傾斜マイナス30度, 操作者B

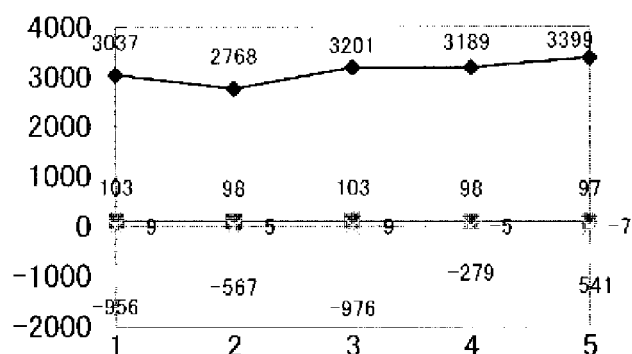


図21 減速, 傾斜マイナス30度, 操作者C

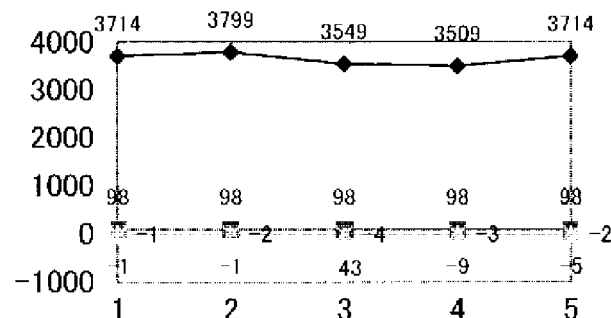


図22 減速, 傾斜マイナス30度, 操作者D

4.6 減速制御の考え方

実際の操作性に近づけるため、土砂上面とバケット爪先との距離に応じてフロント速度を減

速する減速係数Kを用いた。その結果減速を加えない場合に比べ大きく操作性が向上した。実際の掘削において負荷は土質により一律でないため、掘削抵抗による減速が必ずしも有効に働くとは思われないが、減速そのものは精度に良い方向に働く事が分かった。

また、図10における減速係数は図23のようにも表すことができる。この図は減速を目標掘削面とバケット爪先の距離に応じて行う事を表している。すなわち、目標掘削面近くではフロント速度を小さくする制御を行なっている。掘削負荷のシュミレーションではなく、標掘削面付近で、動作速度を遅くすることにより精度向上を実現したとも言える。

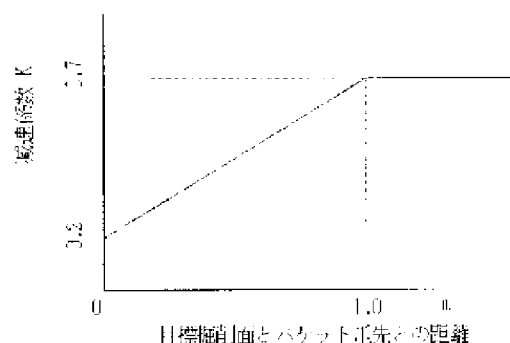


図23 減速係数K

5. 領域制限制御

目標掘削面より下にバケットが入りこまないように自動制御を行う。

5.1 制御内容

Pre-Set Depthより上部ではアーム、ブームは操作レバーの操作量に応じて動作する。バケット爪先がPre-Set Depthに近くなりBuffer Zoneに入るとバケットがPre-set Depth Lineに沿うように補正を行う。また、万一Pre-set Depth Lineを超えた場合にはPre-set Depthに復帰させるように補正を行う。

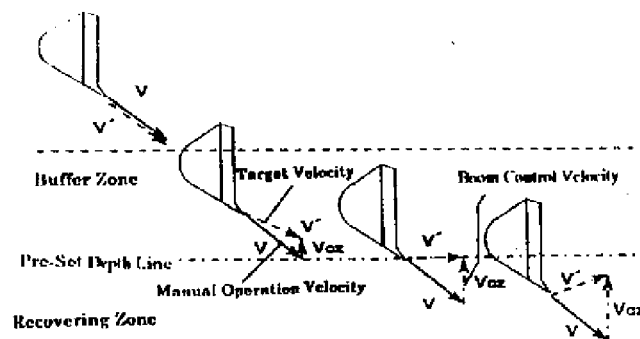
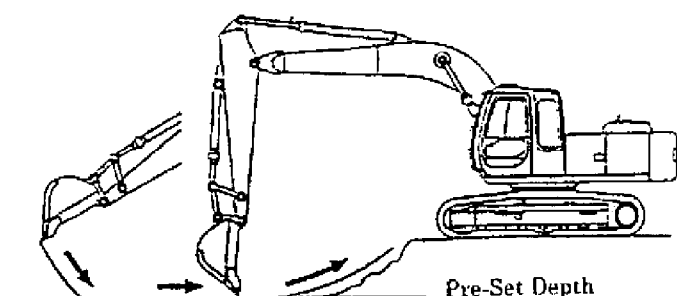


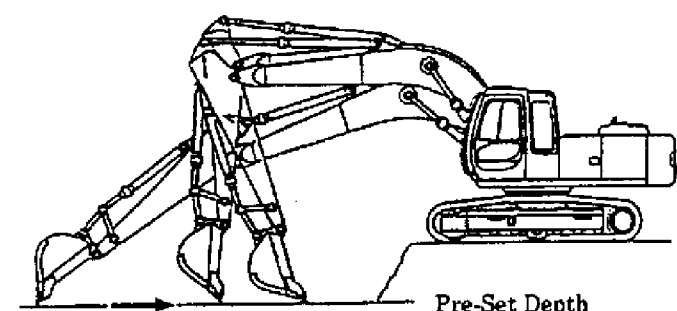
図24 掘削制御作動原理

掘削時のフロント動作を図25に示す。Pre-set Depthを超えずにPre-set Depth Line

に沿って掘削するように自動的にブーム上げが働く。図25(a)はアーム引き操作のみの場合の動作を表す。図25(b)はアーム引き+ブーム上げ操作の場合の動作を表す。



(a) 操作：アーム引き



(b) 操作：アーム引き+ブーム上げ

図25 掘削制御による動作

5.2 実験結果

操作方法

目標面を設定した後、アーム引きとブーム下げを同時に操作して掘削を行った。ブーム下げ操作により目標掘削面に押し付けるような掘削操作になるが領域制御によりフロントが設定面に入り込まずに掘削される。

図27に水平の場合の結果を示す。目標掘削面より深く入り込まないため、気を使わずに楽に掘削できる。

実機の応答性を考慮し一時遅れを加えているが、その影響により、目標面掘削面とのずれが生じている。応答遅れをゼロにして操作を行うと、目標面と掘削面は一致する。

図28、29に傾斜掘削の場合の結果を示す。水平掘削と同様に応答遅れによるずれが生じている。傾斜30度の場合には比較的ずれが小さい結果となっている。

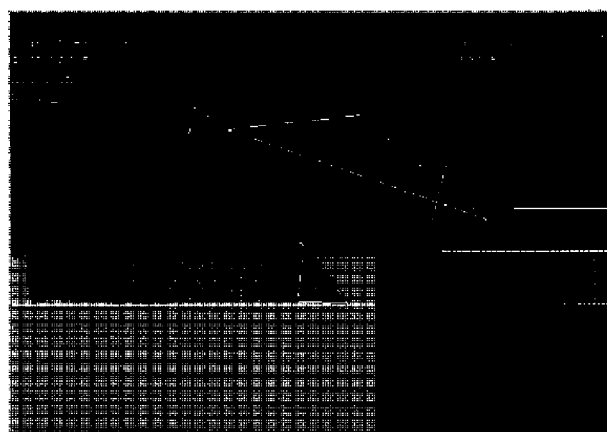


図26 「領域制御, 水平掘削」の掘削結果

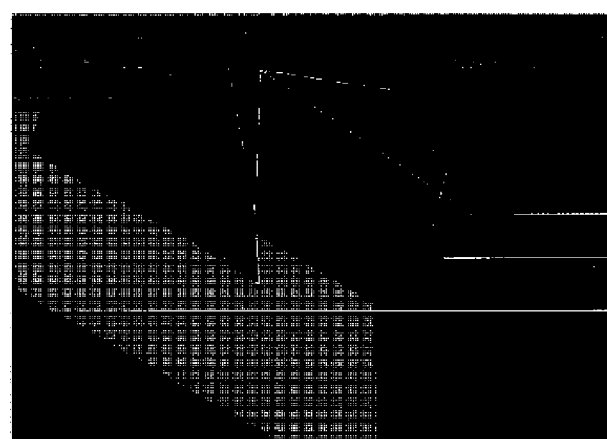


図27 「領域制御, 傾斜プラス30度」の掘削結果

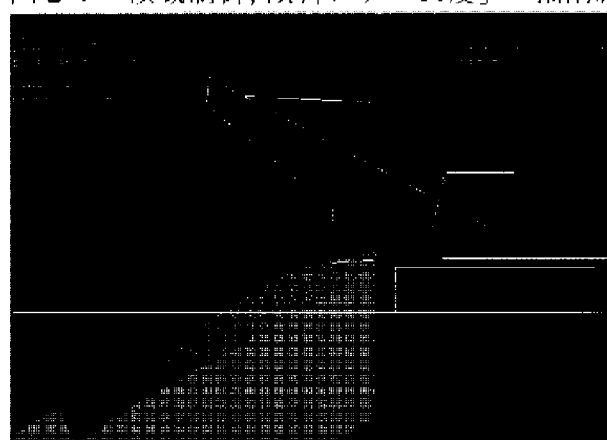


図28 「領域制御, 傾斜マイナス30度」の掘削結果

5.3 評価指標による考察

水平掘削の場合の評価指標のグラフを図29に示す。掘り残しはあるが掘り過ぎがない結果となっている。

傾斜30度掘削の結果を図30に示す。1, 2回目の精度は掘り過ぎ、掘り残し共に大変良い結果となっている。3回目は掘り残しが多くなった。レバーの操作のタイミングが影響していると思われる。

傾斜-30度掘削の結果を図31に示す。傾斜30度の場合と比べかなり悪いデータとなっている。掘削面によって特性が変化し、それが制御精度に影響をおよぼしていると考えられる。

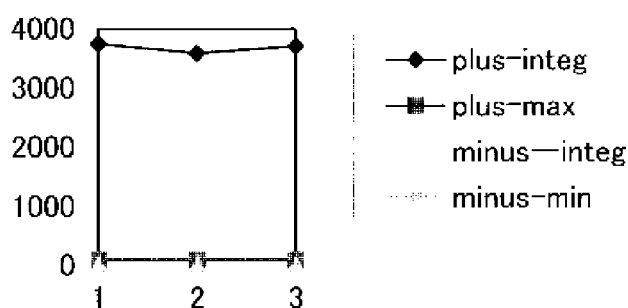


図29 「領域制御, 水平」の評価指標

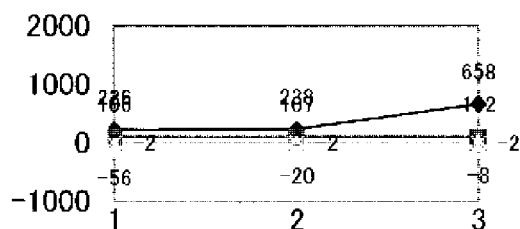


図30 「領域制御, 傾斜プラス30度」の評価指標

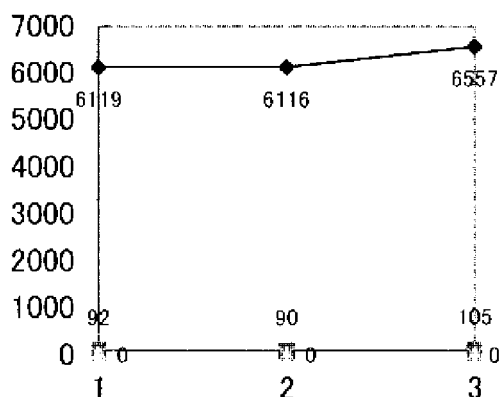


図31 「領域制御, 傾斜マイナス30度」の評価指標

タを作成し、以下の事が確認された。

- ・目標掘削面に沿って掘り過ぎないように掘削することはかなり気を使う作業であることが分かった。
- ・シミュレータ上での操作において、目標掘削面付近でフロントの動作速度を遅くすることが精度向上に有効であることが分かった。
- ・シミュレータ上の操作において、領域制限掘削制御を行うと気を使わずに楽に操作できることが確認された。

今回、シミュレータで操作性の確認を行ったが、実際の掘削においては土質の影響により掘削状況がランダムに変化する。シミュレーション結果のみではなく実機での確認を行い、シミュレーション結果と比較する必要がある。

参考文献

[1] 羽賀正和, 渡辺洋, 藤島一雄, 富田貞久, 外部基準方式領域制限掘削機能を搭載した油圧ショベルの開発, 平成9年度建設機械と施工法シンポジウム論文集, P563/568 (1997)

[2] DAVID A. BRADLEY, DEREK W. SEWARD, Artificial intelligence in the control and operation of construction plant the autonomous robot excavator, Automatic in Construction 2, Elsevier, P217/228(1993)

[3] Narong Anankawanich, John K. Schueller, Robotic analyses and simulation of automatic control of excavator finishing trenching, Heavy vehicle Systems Int. J. of Vehicle Design, Vol2, No. 3/4 (1995)

[4] DAVID A BRANDLEY, DEREK W. SEWARD, The Development, Control and Operation of an Automatic Robotic Excavator, Jurnal of Intelligent and Robotic Systems 21, P73/91 (1998)

[5] L. Plonecki, W. Trampeczynski, J. Cendrowics, A concept of digital control system to assist the operator of hydraulic excavator, Automation in Construction 7 Elsevier Science B. V., P401/411(1998)

6. 結言

油圧ショベルのフロント動作シミュレー