

60. ブルドーザ操作シミュレーションの開発

建設省（土研）：吉田 正・石松 豊
*三村 茂男

1. はじめに

建設業における作業環境の改善、生産性や施工品質の向上等の課題を解決する手段として、建設機械の自動化及びロボット化の技術開発が行われており、一部の工種、工程においては、建設ロボットの普及が進みつつある。土工作业において使用される建設機械は、作業対象物が土であることが多く、その操作にはかなりの熟練を要し、出来型や作業効率はオペレータの能力によって大きな差違が生じると言われている。そのため、操作に熟練したオペレータによる施工が望まれる。

近年の熟練オペレータの不足や操作に熟練するまでに長期間かかることなどを考えると、作業の自動化等により、未熟練なオペレータでもある程度良好な施工が可能な建設機械の実現が必要である。

ブルドーザのオペレータには、車体の傾斜変化や履帯のスリップの発生などの作業状況を的確に把握しそれに応じた適切な判断と操作を行うことが求められる。しかし、作業対象物であり車体の走行路盤でもある土は、作業の進捗とともに形状が複雑に変化していくため、作業状況に対応して機械をうまく操作することは、オペレータの「うで」即ち熟練度に頼る部分が大きい。

これが、運転経験の少ないオペレータにとって良好な施工を行うことが困難な原因の一つとなっていると考えられる。

筆者らは、オペレータの操作の経験則をブルドーザ制御に取り入れる方法としてAIの応用を検討した。本稿では、その検討結果とともに、熟練オペレータの操作論理（操作データ）を再現性（同一の作業環境）の高い条件で収集することを目的に開発したブルドーザ操作シミュレータの概要を報告する。

2. ブルドーザ制御へのAI手法応用の検討

ブルドーザのAI制御を考える場合、図-1のように階層構造にブルドーザの制御システムを考えることができる。

2.1 作業計画

施工の総作業量に対して、ブルドーザの運転計画をする部分であり、この計画は土質によって適時変更される。現実的には作業計画を決定した後、外界の変化によって当初の計画通り作業を行うことが不可能になる場合が考えられる。

このような場合に対応可能な作業計画を行うには、外界の変化に応じた土質の認識が必要であり、現状の計測技術では非常に困難と思われる。



図-1ブルドーザの制御システムの構成

2. 2 作業単位の制御

熟練オペレータに最も依存する部分であり、各作業単位におけるブレードの動作制御（非線形制御）にあたる。ブレードで掘削した部分にブルドーザ履帯が入ることによる車体の傾斜変化に対するブレードの操作や整地作業時のブルドーザ本体の姿勢変化に対するブレードの操作などが挙げられる。

2. 3 個別操作器の制御

ブレードの位置制御を実現するための油圧シリンダのサーボ制御といえる。

2. 4 ブルドーザのAI制御の検討

以上の検討により、ブルドーザ制御へのAI適用の対象として「作業計画」及び「作業単位の制御」が挙げられる。「作業単位の制御」は、操作そのものに癖が織込まれているオペレータの操作からのパターン認識やオペレータが行ってる判断の仕組みを用いてブレードの操作制御を行うものであり、これらを線形制御で対応するには種々の限界があることからAIで対応すべきものであるといえる。

本研究においては、「ブレードにより掘削を開始してブルドーザの履帯が掘削部に入り、定常掘削の状態になるまで」の過渡的な領域の制御についてAIを適用することを想定した。

3. ブルドーザ操作シミュレータ

3. 1 開発の目的

ブルドーザの作業対象物は一般に土であり、車体前面に取付けたブレードにより前方の地盤を掘削、掘削により凹凸の生じた地盤を走行しながら作業が進行する。ブルドーザの作業中の挙動は、地盤の形状によるとともに、車体の荷重などによる接地地盤の変形、また掘削に対する地盤の抵抗力などブルドーザの姿勢変化には土の性質が大きく影響している。従って、オペレータの判断、操作も扱う土の性質によって異なったものとなることが予想される。

しかし、ブルドーザが作業対象とする地盤の条件は同一であることは極めて稀であり、その挙動の分析から有意な結果を得ることは難しい。

そこで、オペレータの操作データを再現性（同一の作業環境）の高い条件で収集することを目的に、ブルドーザ操作シミュレータの開発を行った。

3. 2 シミュレータの概要

製作したシミュレータは、コンピュータ上でブルドーザの2次元の運動モデルを構成し、ブレード操作レバーを模したジョイスティックからの入力データによりリアルタイムでその位置・姿勢の変化をCRT画面上に表示するものである。

今回製作したシミュレータでは、土の圧密などによる変形については地盤を剛体として扱い変形は生じないこととした。また、ブレードに対して地盤の掘削抵抗は生じないこととして簡略化した。

3. 3 システム構成

シミュレータは、パソコン及びブレード操作レバーを模したジョイスティック等からなる。プログラムは、①走行速度等を設定する作業条件設定部、②ジョイスティックからの操作データ入力部、③操作入力によるブレード位置計算部、④ブルドーザ姿勢計算部、及び⑤ブルドーザ本体と地形を表示する画面表示部等からなる。全体のプログラム構成及びシミュレータの画面を図-2及び図-3に示す。

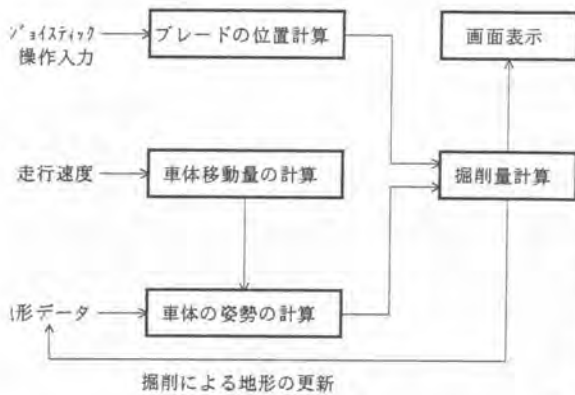


図-2 プログラム構成

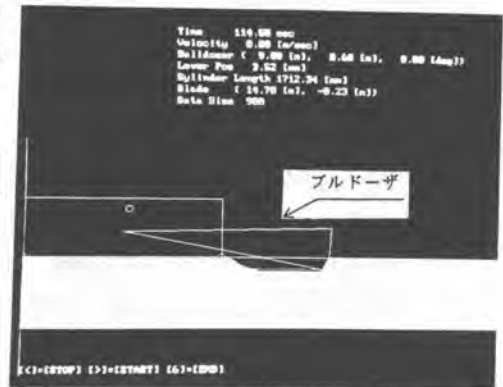


図-3 シミュレータの画面

3.4 車体の姿勢の計算方法

履帯を剛性履帯として、また地盤を剛体とみなしブルドーザの姿勢を計算した。

ブルドーザの姿勢は、重心にかかる車体荷重が履帯面に作用する地点を中心として、その前後の地盤と履帯面が接触する2点による。

この2点を計算する基本的な考え方は、地形の隣合う点と点を結んだ線の傾きを、重心位置から前方向あるいは後ろ方向に順次比較していき、低い位置にある点を処理の対象から削除しながら、履帯の前後端までこの処理を繰り返すことで履帯に接地する2点が決定される。

図-4 に車体姿勢の計算方法の一例を示す。

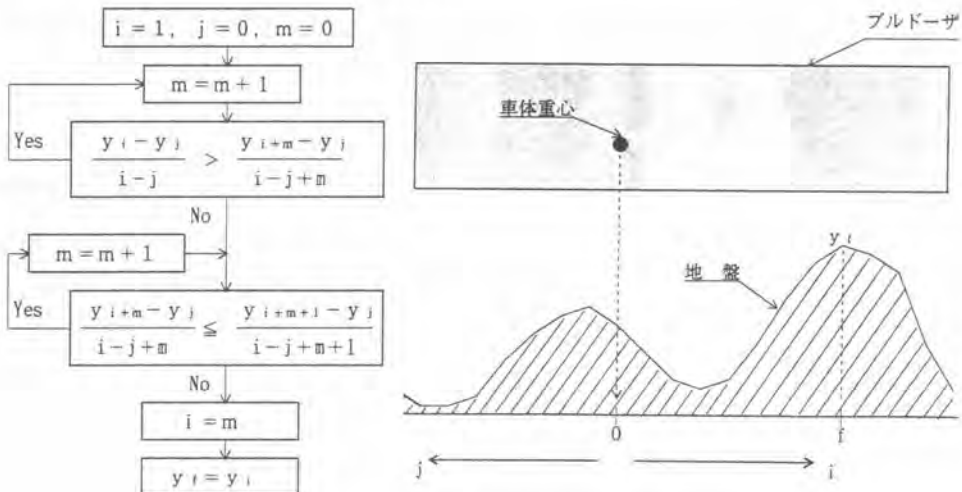


図-4 車体姿勢の計算方法

3. 5 操作性

実機の操作との整合を考慮し、図-5に示す実作業事例の出来型測量結果から実験条件を掘削深さ0.2m、ブレードの貫入勾配を車体の移動距離に対して1/10として設定した。オペレータは、ディスプレイに表示された掘削目標値にブレードを追従させるようにブレード操作レバーを模したジョイスティックを操作することとした。

図-6及び図-7は操作結果の一例である。

なお、操作者は十分に操作練習を行い、ある程度操作に習熟した後、実験を行った。

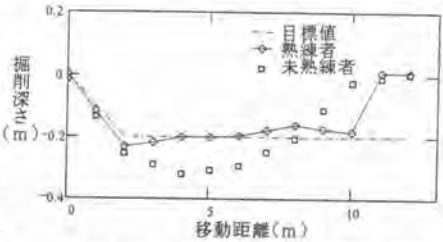


図-5 実機での出来型測量結果

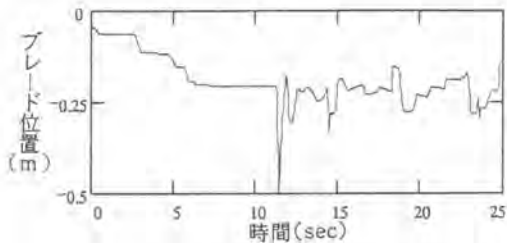


図-6 シミュレーション結果(ブレード)

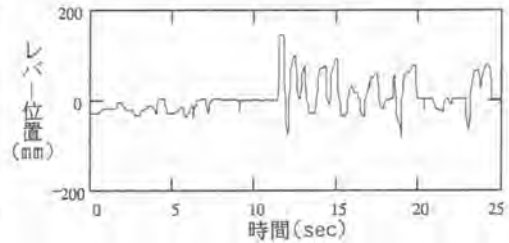


図-7 シミュレーション結果(レバー操作)

4. まとめ

今回製作したシミュレータにより、オペレータの経験則(操作データ)をとる上での、ブルドーザ挙動の機械系のダイナミクスを表現することが出来た。研究により得られた結果は以下の通りである。

- (1)操作結果から、車体の傾斜に応じたブレードの追従操作ができていたことが確認された。
- (2)図-6のシミュレータの操作結果に見られるブレード位置の急激な変動は、車体の傾斜変化にあわせて車体前面に取付けたブレードの位置が変化していることによる。今回製作したシミュレータはブレードによる掘削抵抗を考慮していないので、実際よりも大きな変動となっている。
- (3)シミュレータを現実の挙動に近づけるためには、車体荷重による支持地盤の変形や土のせん断による掘削抵抗など、土の特性をシミュレータに組込むことが必要であり、今後そのための検討が必要である。

なお、シミュレータの開発にご指導ご協力を賜りました筑波大学油田教授及び木本氏、ならびに清水建設(株)市川氏をはじめとした関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 自動化委員会研究発表会資料 「建設ロボットの新しい視点」 1992.7
- 2) 室達朗 テラメカニクス-走行力学- 技報堂出版 1993.2
- 3) 人工知能の技術の利用 (財)日本情報処理協会 1988.12