

47. 無人化施工における遠隔操縦技術の開発

建設省九州技術事務所；木村 直紀，*松岡 雅博
三浦 成治

1. はじめに

建設機械の遠隔操縦で行われた本格的な無人化施工は、雲仙普賢岳の大規模な堆積土砂の除去作業で知られている。この作業で、短期データではあるが通常の土工工事と変わらない施工実績を挙げており、我が国の遠隔操縦技術は一応のレベルであることを証明した。

しかし、これは雲仙普賢岳の土砂除去作業という特殊条件下において、大型機械の導入や無人化が幸いして思い切った運転を行えたことなどによるものであり、一般的な汎用の建設機械では、無人化施工に対応できておらず施工効率は、50%程度といわれている。

そこで、本研究は遠隔操縦支援システムの開発を目的に、汎用機械である油圧バックホウを例に取り、遠隔操縦に熟練していないオペレータの作業能率改善のため、部分定型自動化と先行視野モニタリングを導入し、無人化施工が合理的に行える調査を行ったものである。

2. 調査内容

2.1 調査試験の方法

遠隔操縦の作業効率が低下する詳細原因分析のため、油圧バックホウとダンプトラックの組合わせによる掘削・積み込み試験を表-1の要領で行い、その運転形式を図1～5に示す。

2.2 遠隔操縦によるサイクルタイム増大要因分析

各施工パターンのサイクルタイム構成から、搭乗運転に比べ大幅に施工効率が低下する遠隔操縦によるタイムロスがどの部分に存在するか詳細分析を行った。

2.3 サイクルタイム短縮への有効性調査

(1) 部分定型自動化

掘削から排土までの旋回、排土から掘削に至るまでの動作をソフトプログラミングにより部分定型自動化し、その有効性を検証した。

なお、本試験での部分定型自動化は、1回目にティーチングモードで実際の作業を行い、その後スイッチ切替により自動モードとなるリプレイ方式を採用した。

(2) 先行視野モニタリング

左右旋回時に必要な前方向（先行視野）の情報を与え、単画面（視角60度）と連続画面（視角180度）による作業効率調査を行った。

2.4 無人化施工支援システム

無人化施工を行うためには多くの支援システムが必要であり、これらのシステムについて無人化施工に対する位置付けの取りまとめを行った。

表-1 油圧バックホウによる掘削・積込み試験要領

運 転 形 式	運 転 内 容
パターン① (搭乗運転)	運転席で通常どおりオペレータが作業を行い、作業性、操作性の評価の基準値を得る。
パターン② (無線操縦機搭乗運転)	運転席でオペレータが無線操縦機を抱えて、目視により操作する。
パターン③ (無線操縦1ITV)	キャブ上にカメラ1台を設置し、機外からモニタ画像を見ながら操作する。(ただし、先行視野情報が無いため、モニタ画面上にダンプベッセルの高さ位置を矢印表示する)
パターン④ (無線操縦3ITV)	キャブ上にカメラ3台を設置し、先行視野情報を取り入れ、機外からモニタ画像を見ながら操作する。
パターン⑤ (パターン2+27システム)	パターン3+機外の2方向から撮影する2台の補助カメラを用い、モニタ画像を見ながら操作する。
パターン⑥ (パターン3+27システム)	パターン4+機外の2方向から撮影する2台の補助カメラを用い、モニタ画像を見ながら操作する。
パターン⑦ (定型自動化技術併用)	機外から掘削・積込み位置を目視で確認しながら、掘削は無線操縦機による操作とし、ホスト旋回、排土及びびくろ旋回については自動化による操作とする。

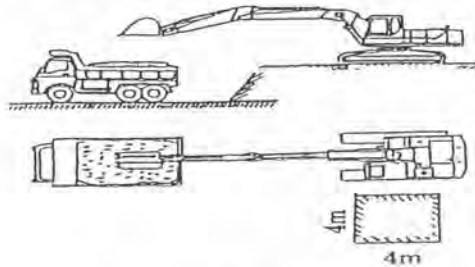


図-1 パターン①②⑦

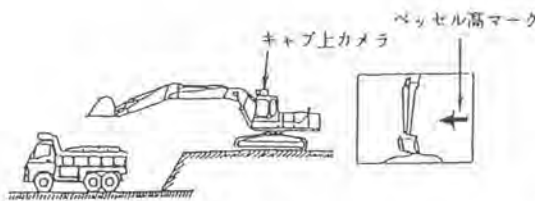


図-2 パターン③

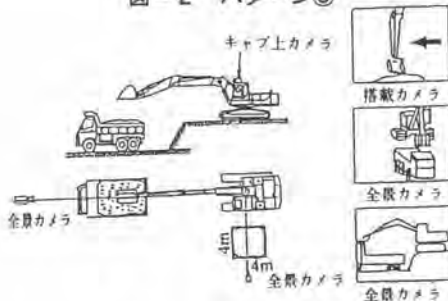


図-4 パターン⑤

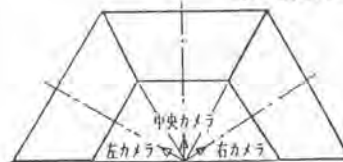
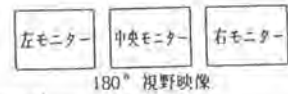


図-3 パターン④

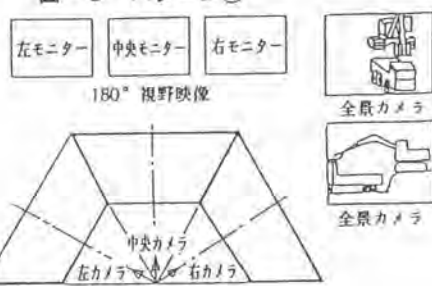


図-5 パターン⑥

3. 調査試験結果

3.1 遠隔操縦によるサイクルタイム増大要因分析

ダンプトラック1台当たり7回の掘削・積込みを1セットとし、施工パターン①～⑥で延べ37

セットの試験を実施した。

また、パターン⑦の自動化システム併用については、4回の積込みを1セットとし、延べ4セットの施工試験を実施した。図-6に各パターン別サイクルタイムの平均値を示す。

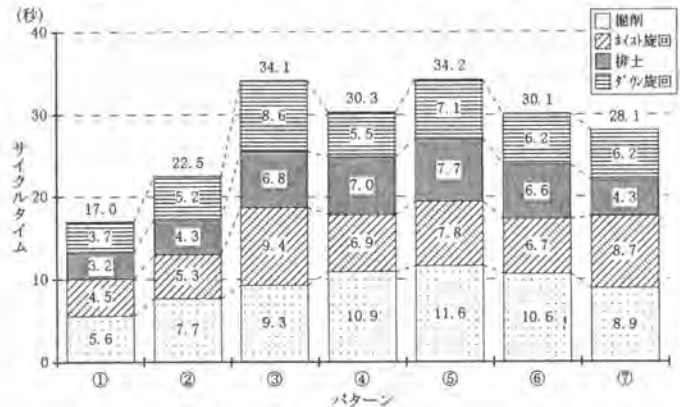


図-6 施工パターン別サイクルタイム

なお、行程動作内容は次のとおりである。



また、無線による固定タイムロス、パターン①の搭乗運転とパターン②の無線操縦機搭乗運転の比較により、視野情報に関係なく無線操縦機を使用したための固有遅れであると考えられる。

そこで、搭乗運転に対しての無線操縦運転の増加率を行程動作別に示してみると図-7となり、

無線操縦機使用のための固有遅れは全体の30%以上であることが判る。特に、掘削とダウン旋回にみられる増加率は大きく、これは、この行程の無線操作回数が多いため、無線の送受信に伴う影響と考えられる。この固有遅れを減少させるためには、無線の応答回数を最小限にし、定型的な動きを自動化する必要がある。

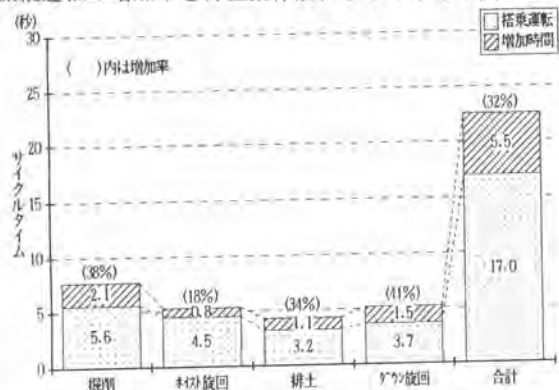


図-7 無線操縦機使用のサイクルタイム増加率

次に、図-8に示す施工パターン別複合作比率を見ると、搭乗運転における複合作の占める割合は80%を越えている。

これは、作業に必要な目視判断が容易に行え、機械にとって最適な複合作が取れるためである。

また、パターン③の複合作が占める割合は、36%であったものが、パターン④の連続画面では51%まで向上している。

これは、単画面に比べて連続画面では、目視判断が容易に行えるため、先行視野情報の有効性があると判断できる。

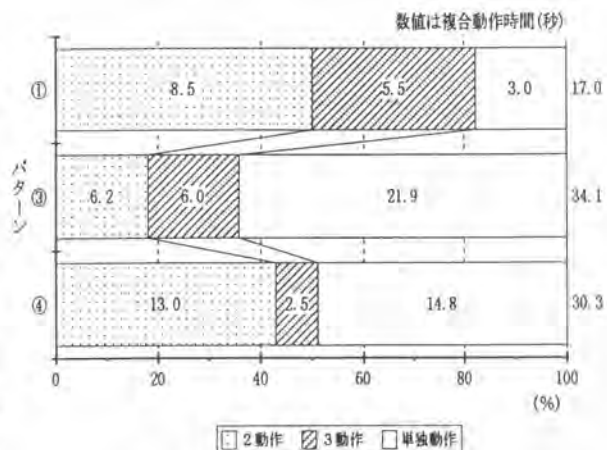


図-8 施工パターン別複合作比率

3.2 サイクルタイム短縮への有効性調査

(1) 部分定型自動化

図-9より、パターン⑦（自動化技術併用）とパターン②（無線操縦機搭乗）のサイクルタイムを比較すると、パターン⑦が25%増となり作業効率の面ではあまり効果が認められなかった。これは、本試験の手動自動切替スイッチの操作を、無線操作レバーから一旦手を離して操作を行う機構としたため、サイクルタイムの増加原因となったものと考えられる。

そこで、今後次のような技術を開発すれば、搭乗運転のサイクルタイムに近い水準まで可能であり、定型自動化技術の有効性は高まるものと考えられる。

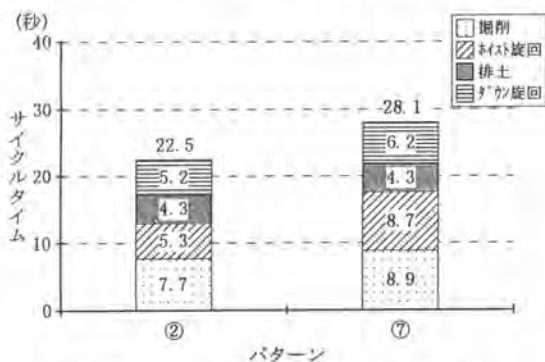


図-9 自動化併用サイクルタイム比較

- ① 手動自動切替スイッチの位置やその回数等を考慮した無線操縦機の改造。
- ② 現場において指定点（掘削位置）から指定点（排土位置）を与えると座標軸管理を行い、途中の動きは最良の複合作で動くソフトプログラムの開発。
- ③ 荷こぼれ防止の排土作業が可能なセンサー等の開発。
- ④ 排土時にダンプトラックの荷台に合わせ、均等に積込む事が可能となるソフトプログラムの開発。

以上の項目が改善されたとして、パターン⑦のシミュレーションを行うと図-10のようになり、改善前に比べて改善後の施工効率は約28%向上する。

また、パターン①の搭乗運転に対しても遠隔操縦では約50%といわれていた施工効率が、約88%まで向上できると考えられ、自動化技術の更なる開発が望まれる。

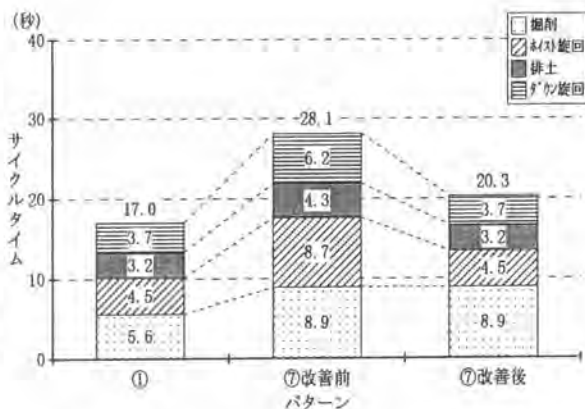


図-10 部分自動化改善効果シミュレーション

(2) 先行視野モニタリング

図-7より、搭乗運転のサイクルタイム17秒に対し、無線による固有遅れが5.5秒であることがわかった。

このことから、固有遅れを固定した時の施工パターン別サイクルタイムは図-11となり、巡回時から掘削点または排土点の情報が得られるパターン④（連続画面）と、先行視野がないパターン③（単画面）の画像遅れに着目して比較すると、

$(11.6-7.8)/11.6 \times 100 = 33\%$ となり、30%以上の作業効率向上が認められ、先行視野情報が有効であることが確認された。

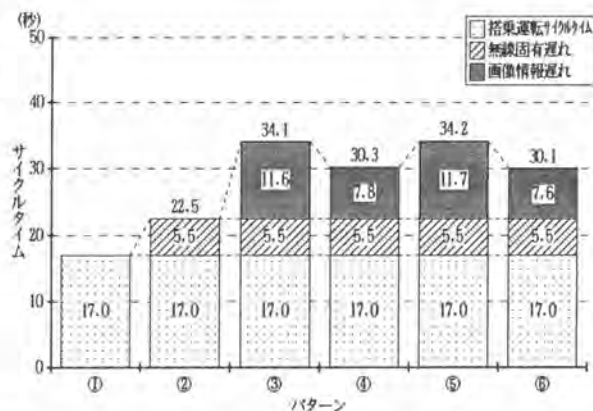


図-11 画像情報によるサイクルタイムの増加

しかし、周囲補助画像（アシストモニター）については、安全・確実の面では効果があり好ましいが、単純な掘削、積込み作業ではパターン③と⑤及び④と⑥から、顕著なタイム差は認められず効率の面では効果があるとはいえない。

3.3 無人化施工支援システム

遠隔操縦には、リモートコントロールされる建設機械だけでなく、それをサポートしている操縦支援システムが非常に重要であり、無人化施工を行うために多くの要素技術からなる支援システムが必要である。

これらの支援システムはリモートコントロール建設機械の操縦そのものを支援する遠隔操縦システムと、施工を助ける遠隔操縦施工支援システムに大別され、図-12のようにまとめられる。

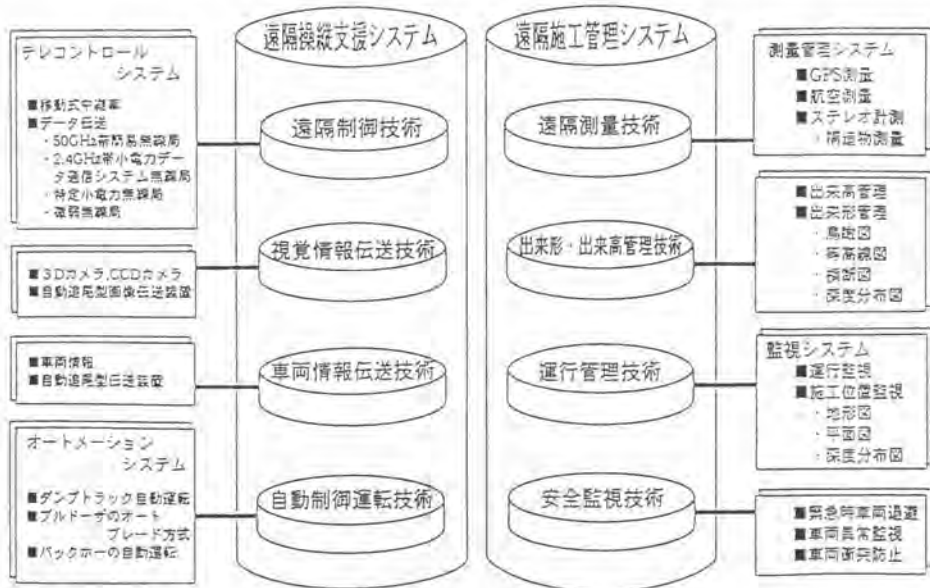


図-12 無人化施工支援システム

4. まとめ

今回の試験分析結果から土工作业に最も有効である自動制御運転技術と視覚情報技術に着目し、部分定型自動化技術、先行視野モニタリングのそれぞれの有効性を定量的に示すことができた。

今後の遠隔操縦建設機械は、様々な現場条件に合わせた施工方法が可能なものが望まれており、遠隔操縦専用機械（運転席をなくす、指令信号による定型自動化）を製作することで、高効率、コスト縮減可能な遠隔操縦建設機械を開発でき、専用機と制御技術、情報伝送技術等の組合せにより、理想的な遠隔操縦支援システムとすることができる。

しかし、現状では専用機をそれぞれが持つという事は困難であるため、一般的には、従来型の汎用機に遠隔操縦機を取付け、有人運転と無人運転を容易に切替可能な機種の開発が望ましい。

また、遠隔操縦で施工することを前提とした特殊条件下の現場では先に述べた理想的な遠隔操縦支援システムの導入が望ましい。