

4. 建設機械遠隔操作の習熟に関する研究

建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察

(独)土木研究所
(独)土木研究所
(独)土木研究所

○ 茂木 正晴
藤野 健一
西山 章彦

1. はじめに

現在、災害発生時（地震・噴火などによる災害）における初動対応として無人化施工が適用されており、雲仙普賢岳等で利用されている。大規模土砂災害等において、この無人化施工技術の適用に関しては、災害の規模や現場状況（人への危険度合い）によって迅速かつ安全な施工技術として期待できるものと考えられる。

無人化施工技術は、土砂災害等発生後の災害緊急対策として、土堰堤工事、除石工事における掘削・積込み・運搬等の機械施工に遠隔操作による無人化施工が導入・活用されている。

土木研究所では、現場で利用されている技術である遠隔システムの操作性に関する研究を進めている。研究は、操作性の向上による習熟度の短縮、作業効率の向上、疲労感の低減を目的とし、モニタの配置、操作、今後のシステム改良に向けた検討を行っている。

本研究報告では、無人化施工に関わる要素技術向上に向けた検討として、建設機械に搭乗して操作を行った場合と現場情報を遠隔地のモニタに表示・操作する遠隔操作システム（雲仙普賢岳で利用されている遠隔システムをベースに土木研究所によって構築したシステム）を用いて操作を行った場合の操作者（オペレータ）の作業効率（時間）及び作業精度の観点から習熟度合いについて実験により検証した結果を報告するものである。

2. 無人化施工の作業効率等に関する要素実験

2.1 実験の目的

映像情報として現場情報をモニタより提供し、遠隔にて操作するシステムに関して操作性に関する検証実験を行った。検証実験では、遠隔操作システムの改善を目的に遠隔操作における作業の習熟度を考察するために、作業効率（時間）、作業精度について実験を実施した。

2.2 実験条件

実験では土木研究所保有の油圧ショベル（写真-1）を利用し、土木研究所内建設機械屋外実験場にて実施した。

主に実現場での掘削積込み作業を想定した施工モデルについて、搭乗操作と遠隔操作システムによる操作の比較をすることとした。

検証対象とする遠隔操作システムは、遠隔地において現場情報をモニタにより操作者に提供するものである。計測実験では、操作者（オペレータ）の作業効率（時間）、作業精度について計測、評価した。



写真-1 遠隔操作機能付き油圧ショベル（土研保有）

2.3 実験内容

図-1 に示す建設機械屋外実験場にて、図-2 の障害物を乗り越えて作業エリア近傍まで移動する。

作業エリアでは、掘削作業に見立てて1 t 土嚢等の対象物（写真-2 及び図-2）を移動する。移動に際して、操作者（オペレータ）は、対象物を所定の位置に移動し、マーキングされた箇所内に対象物を移動することとした（写真-3）。なお、実験でのルーチンワーク回数については、各操作者 5 回とした。

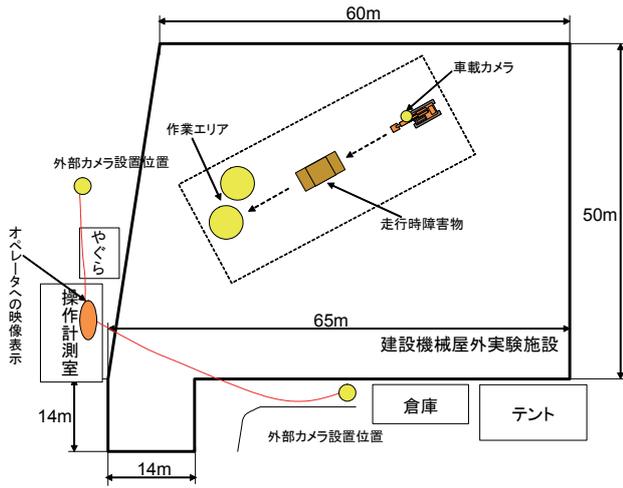


図-1 実験フィールド

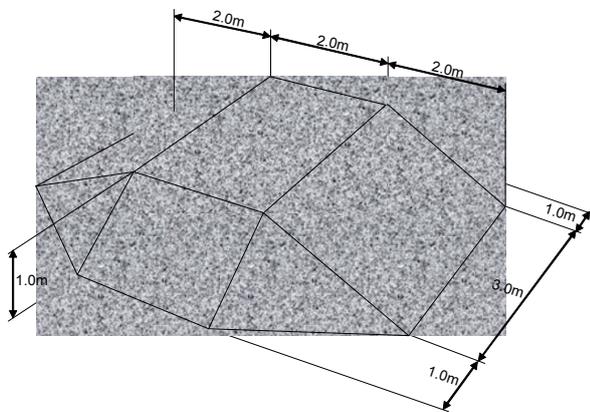


図-2 走行障害物

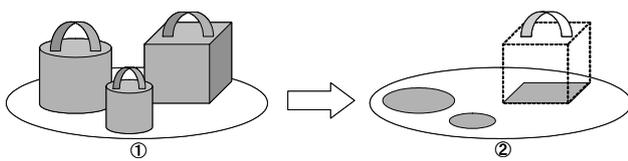


図-3 対象物の移動



写真-3 対象物の移動

1) 操作者（オペレータ）

本実験では、習熟度合いを把握するうえで、以下に示す建設機械操作者（オペレータ）を対象に実施した。操作者（オペレータ）は、主に搭乗での建設機械操作の経験者とした。なお、遠隔操作の経験はないオペレータとした。

- ・ 経験 1 年未満 3 名
- ・ 経験 5 年以上 3 名

2) 実験フロー

実験に関しては、出発地点から目標とする作業エリアまでの移動、作業エリア内での対象物の移動設置、作業エリアから出発地点までの移動とし、作業 1 サイクルは、図-4 に示すものとなる。(実験状況は写真-4 参照)



写真-2 対象物



写真-4 実験状況

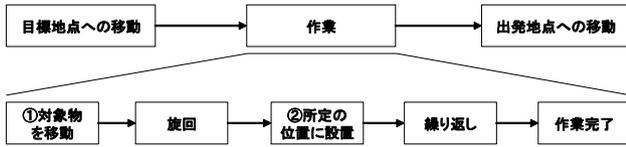


図-4 1 サイクル動作

本実験において、搭乗操作に関しては、操作者（オペレータ）の作業効率（時間）・作業精度を評価し、習熟度を検討するうえ指標とする実験ケースである。

遠隔操作システムによる実験については、写真-5 に示すようにプレハブ内での操作とし、外部の情報プレハブ内で分からないようしたうえで実験を実施した。



写真-5 操作状況（遠隔操作）

2.4 実験結果

実験結果に関しては、作業効率（時間）・作業精度を以下に基づき整理した。

1) 作業効率（時間）

経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）の走行・掘削までの作業時間記録データについて、搭乗操作データと遠隔操作データの解析を行い、それぞれ 3 人の平均結果を図-5～8 に示す。

作業効率（時間）において、搭乗操作に関しては、経験 1 年未満のオペレータ操作効率がトータルサイクルタイムで 150sec 程度の低減が見られた。

また、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）に関しては、遠隔操作において経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と同様な 500sec 程度の低減が見られた。

作業効率の観点から熟達度に関しては、搭乗操作及び遠隔操作のいずれも 1 回目の操作以降において操作の慣れが見られる傾向が見られた。

平成 22 年度に実施した遠隔操作経験者による習

熟度の確認する実験結果⁽¹⁾⁽²⁾では、3 回目以降からサイクルタイムの収束が見られており、本実験での経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータはいずれも遠隔操作未経験者）に関しても類似した習熟を示す結果となった。

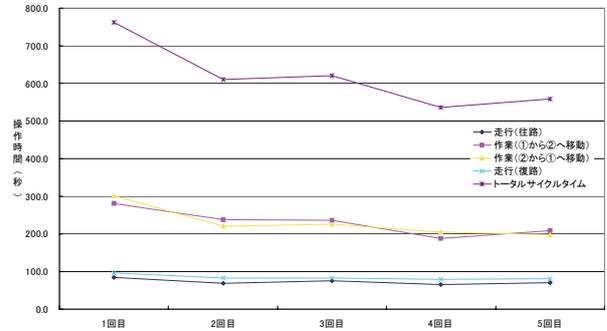


図-5 経験 1 年未満 OP サイクルタイム（搭乗操作）

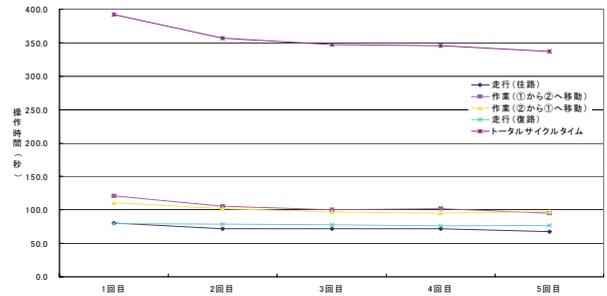


図-6 経験 5 年以上 OP サイクルタイム（搭乗操作）

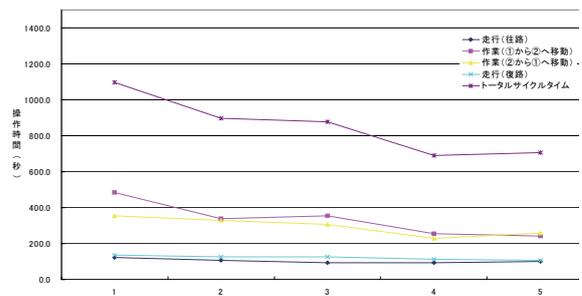


図-7 経験 1 年未満 OP サイクルタイム（遠隔操作）

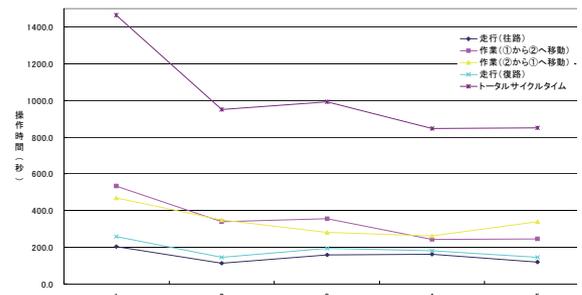


図-8 経験 5 年以上 OP サイクルタイム（遠隔操作）

2) 作業精度

作業精度の計測に関しては、写真-6 に示すように対象物の移動作業後の設置位置のズレについて搭乗操作と遠隔操作において計測を行った。



写真-6 設置位置のズレ計測状況

計測値による精度評価に関しては、当初設置されていた位置を基準として移動作業後に設置した際に生じるズレとの比（作業後設置位置／当初設置位置）を比較評価とし、当初の設置位置に近い位置に戻した場合を施工精度が高いものとして評価を行った。

計測結果については、図-9～12 に示す傾向が確認できた。

搭乗操作に関しては、図-9 に示す経験 1 年未満のオペレータと図-10 に示す経験 5 年以上のオペレータとを比較してみると経験 5 年以上のオペレータが経験 1 年未満のオペレータよりも施工精度が相対的に良好である結果が得られた。

遠隔操作に関しては、図-11, 12 に示すように経験 1 年未満のオペレータと経験 5 年以上のオペレータでは、バラツキが大きく適切な施工精度が得られない結果が見られた。

搭乗操作では経験者が有意であるにも関わらず遠隔操作等では、有意であることが認められる結果は見られなかった。

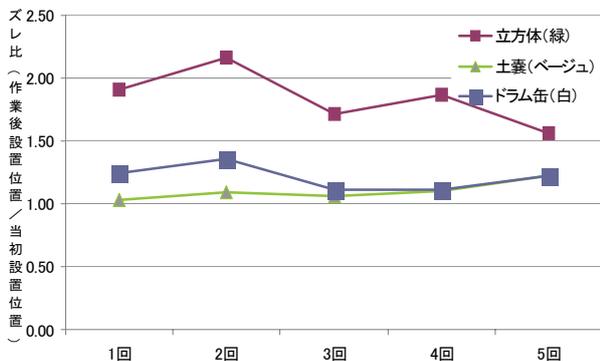


図-9 経験 1 年未満 OP 施工精度 (搭乗操作)

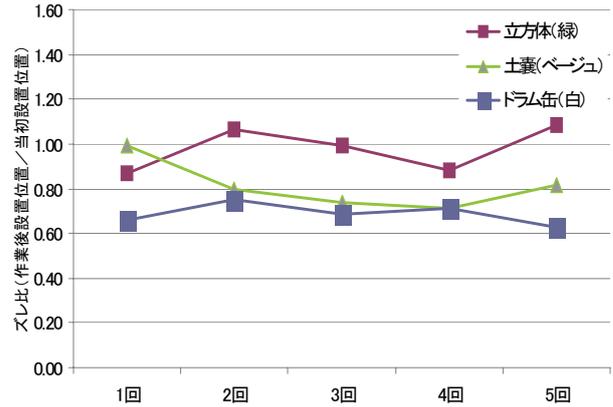


図-10 経験 5 年以上 OP 施工精度 (搭乗操作)

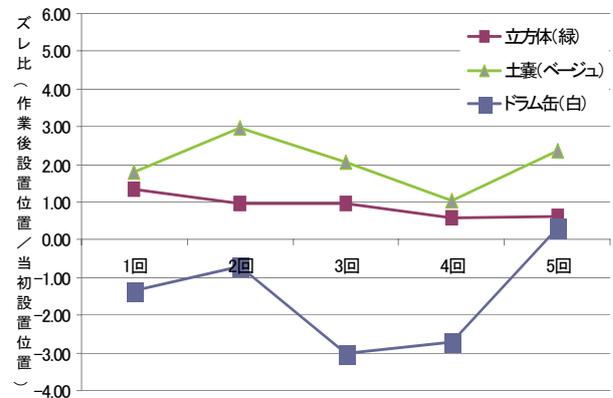


図-11 経験 1 年未満 OP 施工精度 (遠隔操作)

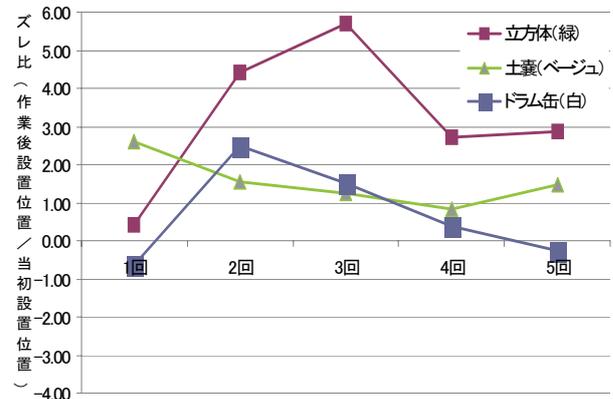


図-12 経験 5 年以上 OP 施工精度 (遠隔操作)

また、実験後に操作者（オペレータ）に対してヒアリングを実施した結果、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）ともに奥行き感覚をつかむことの難しさが挙げられた。特に遠隔操作において、2次元の映像からの情報のみでは、対象物の掴み作業で奥行き判断に時間を要するとともに所定の設置位置に戻す作業判断にも時間を要した。そのため搭乗

操作と遠隔操作の精度に相対的ではあるが違いがみられた。

3. まとめ・考察

3.1 搭乗操作及び遠隔操作の共通事項

搭乗操作及び遠隔操作に関しては、概ね 2 回以降の操作よりサイクルタイムの収束が見られた。その内訳として、走行と作業に関して大きく大別すると走行に関しては操作回数に関係なくサイクルタイムが安定しており、操作者（オペレータ）の習熟が確認できる結果は顕著に見られなかった。このことから、今回の実験では走行における操作者（オペレータ）の操作回数による個人の技量が左右するものでないことが伺える。

一方、作業に関しては、対象物を掴む動作が付加されていることがサイクルタイムの差異に大きく寄与する結果となった。操作者（オペレータ）は対象物を掴む行動を行ううえで奥行き感覚及び写真-7、8に示す視点移動（バケット部の色帯線）によって幅感覚や奥行きを知覚しながら作業を行っていることが作業時間の増加につながるものが共通事項として考えられる。



写真-7 オペレータ作業視点（経験1年未満）



写真-8 オペレータ作業視点（経験5年以上）

3.2 熟達度に関する評価

実験結果（図-5～8）に基づき操作回数の増加に伴い操作者（オペレータ）は熟達していることが分かった。しかし、共通事項でも述べたように奥行き感覚の知覚によって作業（行動）の遅れに寄与していることが操作者（オペレータ）の作業視点（写真-7,8）によって分かっていたが、これと同時に作業の熟達度合いの違いを確認することができた。

写真-7は、経験1年未満の操作者（オペレータ）の視点をアイカメラによって捉えたものであり、対象物を捉えようとするポイントが掴めずに視点が泳いでいるような状況が視点移動（バケット部周辺の色帯線）より分かる。一方、写真-8は、経験5年以上の操作者（オペレータ）の視点をアイマークレコーダによって捉えたもので、対象物を掴もうとする場合、左右の位置関係を的確に捉えていることが分かる。

このことは、作業内容（ルーチンワーク）の把握の有無、作業するうえでの自身の位置や対象物の配置及び建設機械の状態把握といった空間把握の構築が熟練者と未熟練者の間に違いとして定性的に現れているものと考えられ、無駄な視点の動きが目的とする円滑な動作を阻害する要因だと考えられる。

経験1年未満の操作者（オペレータ）の操作に関する阻害要因を解消する方策として考えられることとして、操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方を模倣すること、そのための方策の検討によって経験5年以上の操作者（オペレータ）に近づくことができるものと考えられる。

3.3 作業効率（時間）と精度の関係と習熟

作業効率（時間）と精度の関係を整理した。なお、実験データを整理する中で搭乗運転データと遠隔操作データをまとめているが、遠隔データにバラツキが見られたことから、本報告では、搭乗データのみで考察を述べることにした。

実験結果及び図-13, 14に示すように作業効率（時間）に関しては、2回目以降から安定したものっており、バラツキはあるものの精度に関しても安定した結果が見られる。

経験1年未満の操作者（オペレータ）と経験5年以上の操作者（オペレータ）を単純に比較してみると経験1年未満の操作者（オペレータ）の約半分の作業効率（時間）と精度に関しては、経験1年未満の操作者（オペレータ）が約1.4に対して経験5年以上の操作者（オペレータ）は0.8とい

った精度を確保した結果となっており、作業効率（時間）と精度の観点から習熟差を確認することができた。

この習熟差に関しては、寄与する要素として経験によるものが高いものと考えられるが、寄与する要素を考察してみると 3.2 で述べた操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方によるものと考えられる。仮説ではあるが、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）の試験回数を多くすることによって、ある回数においてパラダイムシフトが起こり、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）と同様な作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）をとらえることができ、類似した結果が得られるものと考えられる

また、経験 1 年未満の操作者（オペレータ）と経験 5 年以上の操作者（オペレータ）を比較してみると、作業効率（時間）と効率の試験回数毎のグラフ上の起伏変動に相関が見られる。

例えば、図-13 の経験 1 年未満の操作者（オペレータ）に関しては、試験回数に対する作業効率に若干のバラツキが見られ、このバラツキは作業効率（時間）を短くしようとするすると精度が悪くなるといった傾向が見られている。これは、図-14 に示すように技量に依存するところが大きく、安定した技量を獲得することによって安定した精度を操作者（オペレータ）が得られるものと考えられる。

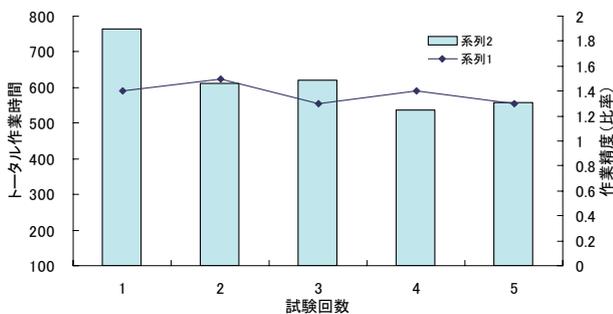


図-13 搭乗運転における初心者 OP の作業時間と精度

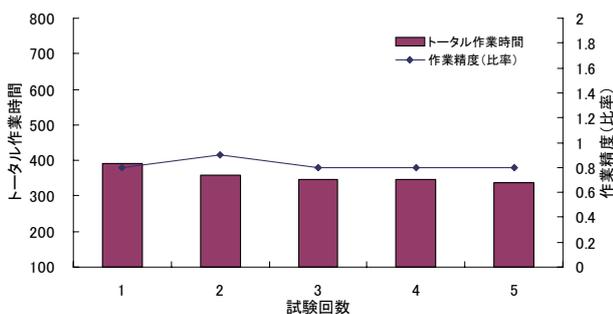


図-14 搭乗運転における熟練 OP の作業時間と精度

なお、本実験において、経験 5 年以上の操作者（オペレータ）において遠隔操作データのバラツキが見られた要因として、実験終了後にヒアリングしたところ通常使用している操作方式（日立式操作方式）に対して、遠隔操作の操作が標準操作方式（JIS 式）となっていたため、経験年数が長い操作者（オペレータ）は遠隔での操作において違和感が生じたために作業効率等にバラツキが生じたものと推定される。

逆に、経験が浅いオペレータはそのような方式の違いはあまり左右されず、熟練者に比べると作業効率等は技量によるバラツキであることが分かった。

4. 今後の課題

本報告で述べた実験結果については、経験1年未満と経験5年以上の操作者（オペレータ）それぞれ3名によるデータ構成にしかすぎない。

今後は、被験者数を増やすことによってデータの信頼性を向上させ、本研究成果によって得られた、基礎データに基づき整理した仮説を証明するための実験を進め、操作者（オペレータ）の作業内容の把握（操作方法の把握を含む）と作業視点を提供している環境（視覚情報）のとらえ方について検証を進める予定である。

また、オペレータの作業に関する慣れや遠隔操作を円滑に進めるうえでの奥行き感覚の把握について生態心理学的な観点から研究を進めたい。

参考文献

- 1) 茂木正晴・藤野健一・大槻崇：建設現場への無人化施工技術の普及と今後の技術ニーズ-遠隔操作システムの検証実験報告- 第12回建設ロボットシンポジウム論文集 pp89-96, 2010. 9
- 2) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto :ORESEARCH ON VISUAL POINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHINERY、The28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction pp532-537 2011. 6