

2-7 大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 27

担当チーム：技術推進本部先端技術チーム

研究担当者：藤野健一，茂木正晴，油田信一，
山口崇，西山章彦，橋本毅

【要旨】

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。

本研究では、災害発生時の対応に関わるプロセスを整理するとともに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検証を行い、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併せて行うものである。

本報告では、これまでに実験によって得られた基礎データに基づき、無人化施工技術において実作業現場で作業効率を評価することの難しさを述べ、次いで、作業効率評価のために現場での掘削作業を想定した繰り返し可能な無人化施工技術（施工効率・ヒューマンファクター等）を評価するための標準的なモデルタスクを提案した。また、これを用いた実験の内容を示して、その有効性について述べるものである。

キーワード：遠隔操作技術，災害，油圧ショベル，モデルタスク，作業効率

1. はじめに

現在、日本では災害発生時（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いる。無人化施工は、人が立ち入ることのできない危険な箇所（雲仙普賢岳、福島第1原子力発電所の瓦礫撤去等）で利用されている。近年、この無人化施工技術の適用において、災害の規模や現場状況（人への危険度合い）に対して迅速かつ安全な施工技術として期待されている。

無人化施工技術は、日本国内における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導入・活用されている。

しかし、導入・活用が進められている中で、現場での作業効率の向上は、迅速な現場での復旧活動に求められるニーズとなっている。

本研究は、現場で利用されている遠隔技術における操作性の向上を目的としたアプローチを進めている。これまでの研究では、無人化施工における作業効率を作業時間の観点から評価し、ディスプレイや通信系などの機器の差異とオペレータの慣れや経験の各々について、それが作業時間に及ぼす影響を検討し、これに基づいて適切

な操作方式や新しい機器の開発を進めている。しかし、開発を進めるためには、現場で実際の建設機械を用いて具体的な作業を行い、その作業に要する時間を計測・評価することが重要で現場での作業は、建設の進行に伴って環境が変化するため、同一の環境条件での実験・計測を繰り返すことができず、これが作業効率に関する十分な検討を妨げていた。

そこで、本報告では、無人化施工技術において実作業現場で作業効率を評価することの難しさを述べ、次いで、作業効率評価のために定式化した、現場での掘削作業を想定した繰り返し可能なモデルタスクを提案した。また、これを用いた実験の内容を示して、その有効性を明らかにものとし、今後の比較検証に反映させるものとした。

2. 無人化施工技術の作業効率評価の課題と対応

現在、無人化施工における作業効率の向上は、操作のためのシステムやその方法を、現場でのトライアンドエラーによって改良し、それを、個々の現場で活用することにより進められている。ここでは、作業効率は、通常、実際の現場での作業における出来高と作業時間により評

価される。

しかし、この評価は比較対象となる指標がないまま行われるため、その現場での統計的な作業時間が把握されるにとどまっていた。したがって、作業効率の評価結果は、他の現場や異なる条件下でのデータと詳細に比較することが難しく、感覚的な評価にとどまり、客観性をもつものにはなっていないという問題があった。従って、現状では、実現場での作業効率を計測したものはあっても、現場における種々の条件に対してオペレータ搭乗時と非搭乗時の作業効率を比較することはできていない。そして、遠隔操作時には、搭乗時に比して作業効率が低下することは分かっているが、それは定性的な評価に過ぎないものであった。このため、いろいろな手法や条件が無人化施工における作業効率に与える影響を定量的に評価することが求められている。

特に災害現場で行われる無人化施工は、変動の大きい厳しい環境条件と、緊急のあるいは限られた工期の中で進められるものであり、その条件下では作業効率の客観的な評価データを得ることは難しい状況にある。

この問題を解決し、施工における作業効率を定量的に評価するためには、現場の作業ではなく、評価を目的とした実験が不可欠である。そして、条件の違いによる作業効率の差異を精緻に評価するためには、特定な条件だけを変えて、他はできる限り同じ条件を維持した実験により、その作業時間や出来形の形状を評価する必要がある。しかし、一般に施工の実現場では作業の進行に伴って作業対象の条件が変化する。したがって、実現場ではなく、定量的な検討を可能とする実験環境を準備して、あらかじめ定められた作業実験を行い、それに対する評価を行う必要がある。

3. モデルタスクの提案

3.1 モデルタスクの概念

無人化施工における作業効率改善のためには、作業時の種々のファクターによる作業時間の違いを比較することが必要であり、そのためには、現場を模した作業において、条件をコントロールして実験を行う必要がある。ここで重要となるのは、実施する模擬作業の設定である。標準的な模擬作業を「モデルタスク」と呼ぶこととする。

設定するモデルタスクは、遠隔操作および搭乗操作の双方で建設機械を操作して行うことのできる作業である必要がある。モデルタスクに対する作業の時間を標準とすれば、異なる実験で得られたデータを比較することにより、作業の違いによる影響の検討もできるため、経験・

知見の一層の蓄積が可能となる。本稿では、このためのモデルタスクの設定を検討する。

3.2 油圧ショベルによる標準的作業

建設機械を用いた作業は、多岐にわたっているが、災害復旧現場や通常の土木工事で最も使用頻度が高い機械と標準的な作業を対象としたモデルタスクの構築から始めるのが良い。そこで、まず、全国の土木建設作業で最も頻繁に使用されている油圧ショベルを対象に標準的な作業条件を整理し、モデルタスクを検討することとした。

油圧ショベルは、建設機械として最も多く使われており掘削作業及びダンプトラックへの積み込み作業や運搬のり面等の所定の形状への成形作業、油圧ブレーカやニブラなどによる解体・破碎作業等に利用されている。

油圧ショベル操作の多くは、図-1のように、まず走行して対象物に近づき適切な位置に停止した後、作業対象を確認、バケット先端部を対象部にアプローチするために旋回・ブーム・アーム・バケットの動作を行う。したがって、動作のパターンは、どのような操作内容であっても機体の走行と旋回・ブーム・アーム・バケットを単独若しくは複合によって操作するものとなっている（図-2）。そこで、モデルタスクもこの一連の動作について構成するのが良いと考えられる。

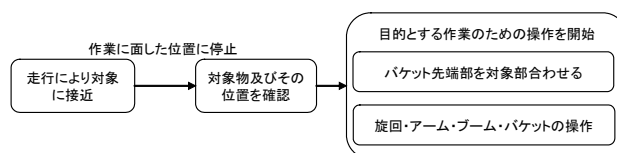


図-1 油圧ショベルによる対象物操作の流れ（土砂掘削例）

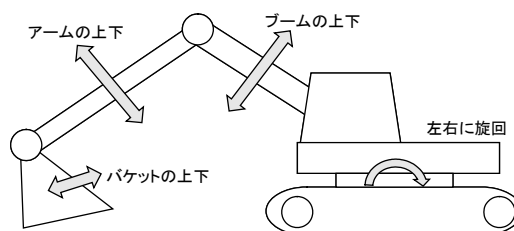


図-2 油圧ショベルの作業時の動作

3.3 モデルタスクに必要な要件

建設機械による作業についてモデルタスクを設定する場合、それによる実験の効果と効率を考えると、以下の4つの条件が要求される。

(1) 作業の標準性

実際の現場において最も多くなされる作業にできる限

り一致していること。

(2) 現実性

作業内容が現場でおこなわれるものから乖離しないこと。また、作業の環境が現場の状況に近いこと。作業内容及び環境条件について、できる限り多くの現場の要素を含み、現場にない作業要素が入り込まないこと。

(3) 再現性

同条件での作業が繰り返し実施できること。

(4) 容易性

実験に際して準備が簡単であり、1回の作業を要する時間が短く、複数回の作業比較が容易にできること。

これらの条件の中での現実性と再現性はいずれも重要であるが、相反する要求である。リアルな現場での作業は、実際の土を掘削し運搬若しくは対象物の破碎、変形させてゆく作業である。そして、実際の作業では、2回目以降の作業を同一条件で行われることはない。

筆者らは、2010年に山砂を用いた油圧ショベルによる掘削作業の評価実験⁹⁾を行ったが、ここでは、掘削によって移動した山砂を元の位置に戻して、次の実験を行った。しかし、作業対象の砂を元に戻しても、この作業を数回繰り返すことで現地盤の砂が混合されてしまい、地面の固さが変化してしまっ、作業における同条件を維持することはできなかった。このように土を対象とする作業では、例えば、動かした土を元に戻して繰り返し実験を行おうとしても完全に同条件に戻すことはできず、数回の作業で作業対象の条件は大きく変化してしまい、再現性を維持することは極めて難しい。したがって、再現性を考慮すると作業の対象としては実際の土の掘削や破碎、変形ではない方法をとる必要がある。

一方、再現性を重視して、各作業要素について、全く同じ作業条件での繰り返しを行うことは、実作業に必然的に含まれる各種の外乱を取り除いてしまうことになる。したがって、同条件の繰り返しを厳しくすると例えば、作業効率の検討において極めて重要な、作業の繰り返しによるオペレータの熟達などについて現実的な評価ができなくなる。すなわち、モデルタスクにおいても環境や作業の外乱や多様性は、それなりに維持される必要がある。これらの再現性と現実性を両立させる適切な組み合わせが重要である。

もう1つの条件として、作業現場のセッティングと作業そのものの容易さも重要である。開発された手法の評価を効率よく行うためには、実験が簡単にできることを留意しなければならない。例えば、オペレータによる学

習の効果を評価するためには、多数の繰り返し実験が必要であり、現実的な実験に許された時間内で数十回以上の繰り返しが可能であることが期待される。これらの理由により、モデルタスクとしては、実際の土を対象とするより、形状が変形せず取り扱いの容易な構造を用いることが、現実的である。

標準性を考えると油圧ショベルを対象とするモデルタスクは、土砂等の掘削（掘り）と積込みを想定して、移動、掘削、引き上げ、旋回、下ろしの一連の動作を想定し、適切な操作の例としてモデルタスクを設定することが望ましい。

3.4 モデルタスクの提案

以上の検討に基づいて、油圧ショベルによる標準的な作業として、主に実現場での掘削・積込み作業を想定した図-3に示すモデルタスクのフローを設定した。ここでは、油圧ショベルは、待機場所から作業対象の前まで走行し、上部旋回体を旋回して対象物に正対する。次にアーム・ブーム・バケットを操作して対象物を掴み、旋回し、所定の位置に設置し、これを繰り返す。その後は再び走行して待機場所に戻る。このモデルは、機体質量3t以上の車両系建設機械（整地等）の運転作業に従事するために必要となる労働安全衛生法及び労働安全衛生法施行令（昭和47年6月8日法律第57号）⁹⁾に基づく運転技能講習時に操作訓練するタスクに類似した動作である。また、走行姿勢等の操作に関しても運転技能講習における操作方法を基礎としている。

ここで、作業の再現性と現実性を両立させるために、掘削作業に類似した軌道でバケットを動かす動作として、図-4に示すとおり固形構造物の掘り・引き上げを行わせることとした。

この方針の下に、油圧ショベルの大きな移動を含む一連の作業（モデルタスクⅠ）と、移動には注目せず実験の効率性を重視した作業（モデルタスクⅡ）を設定した。

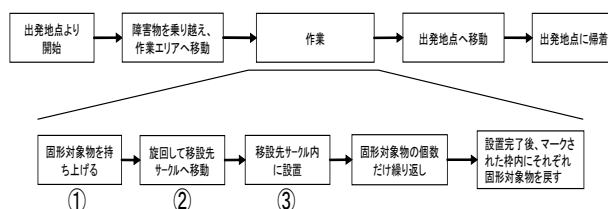
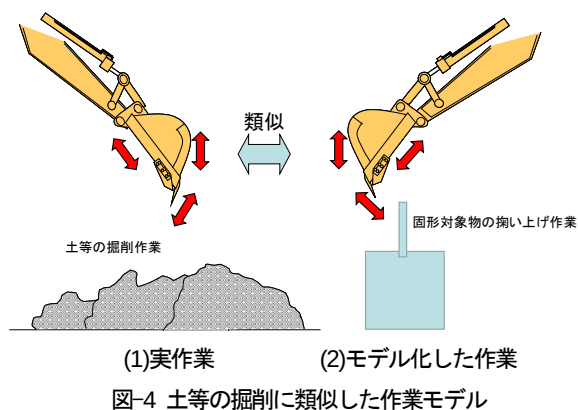


図-3 標準タスクフロー



(1) モデルタスク I：油圧ショベルの不整地走行とバケットによる複数の固形対象物の移設

油圧ショベルは、待機位置より図-6 に示す凹凸のある経路を固形対象物が設置されている作業エリアまで走行し、固形対象物を油圧ショベルのバケットによって移設する。

固形対象物の形状は、ドラム缶(φ570mm×高さ 760mm, 重量約 100kg, 持ち手高さ 2,000mm), 土嚢(800mm×800mm×高さ 800mm, 重量約 300kg, 持ち手高さ 2,000mm), 鋼製立方体(1,200mm×1,200mm×高さ 1,200mm, 重量約 500kg, 持ち手高さ 2,000mm) 計 3 個とする。また、固形対象物には掘り上げ用の鋼製バーをほぼ水平に付けておき掘削に類似したバケットの軌跡により、固形対象物を持ち上げることができるようにする。固形対象物の形状を写真-1, 2, 3 に示す。

このモデルタスクでは、油圧ショベルは図-5 に示す環境を待機場所より地面が凸形状になっている部分(図-6) を乗り越えて作業エリアまで移動し、バケットによる作業に適した位置に停止する。図-7 に示すとおり 3 箇所にマークされた枠内に設置されている固形対象物の持ち手に 1 つずつバケットの先端を掛けて持ち上げ、移設先としてマークされたサークル内へ移設する。全ての固形対象物の移設が完了後、一旦バケットを固形対象物の持ち手から離した後、再び各々の固形対象物を初期位置として示された枠内(図-7) に固形対象物を移設する。

この動作の繰り返しにおいては、走行後の油圧ショベルの位置は毎回適当にバラツキ、それによって、バケット操作に対する環境に適当な変動外乱が与えられることとなる。そのため、固形対象物の移設作業におけるバケットの操作内容は全く同じではなくなっている。



写真-1 固形対象物：ドラム缶



写真-2 固形対象物：土嚢



写真-3 固形対象物：鋼製立方体

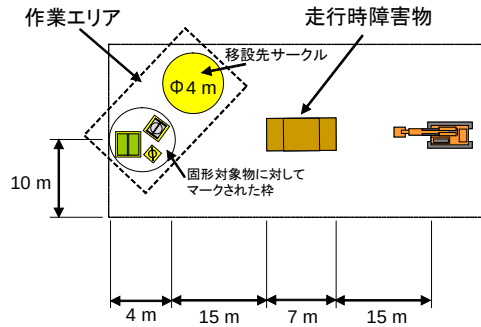


図-5 タスクモデルⅠにおけるフィールド

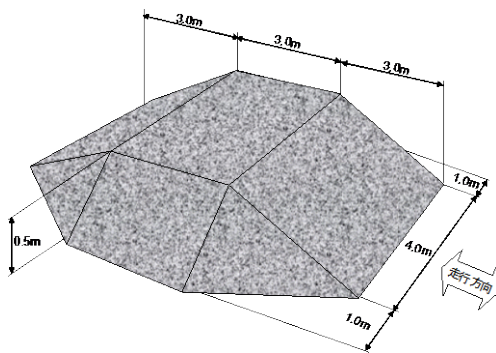


図-6 走行障害物

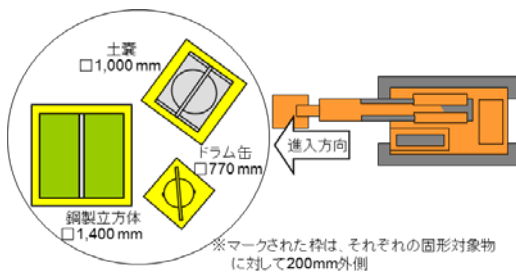


図-7 固形対象物の初期設置位置関係

(2) モデルタスクⅡ：油圧ショベルの走行とバケットによる固形対象物のハンドリングを単純化した固形対象物の移設

モデルタスクⅡは実験の容易性を優先し、短時間での繰り返し実験を可能とすることを主眼として設定した。

このモデルタスクでは、図-8に示すフィールドにおいて待機場所から作業エリアまで走行し、次に固形対象物を油圧ショベルのバケットによって移設する。

このモデルタスクⅡでは、初期位置から、屈曲を含む約30mの経路を走行し、バケットによる作業に適した位置まで移動してから、モデルタスクⅠで用いた1つの固形対象物を移設先サークルに移設し、次に再び、初期位

置の枠内に固形対象物を戻す。ここで移設する固形対象物は、ドラム缶(φ570mm×高さ760mm、重量約100kg、持ち手高さ2,000mm)とする。

モデルタスクⅡは、モデルタスクⅠに比べて1回の作業時間を短くすることによって、より多くの実験回数の確保、作業の容易性を重視していることが特徴である。したがって、このタスクでは、オペレータの操作内容に関する学習過程が操作回数によって変化することをより顕著に計測することができ、搭乗操作と遠隔操作での違いを明確に解析することができるものと考えられる。

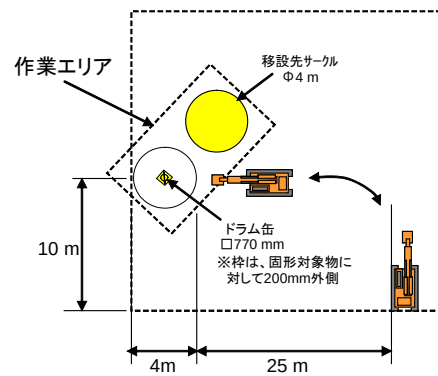


図-8 タスクモデルⅡにおけるフィールド

4. モデルタスクによる実験実施

4.1 モデルタスクⅠによる実験及び結果

図-9に示すフィールドで写真-4,5に示す実験を実施した。

実験は、モデルタスクⅠの動作を、オペレータが遠隔操作により連続して各5回作業を行い、各回の作業に要した時間を記録した。

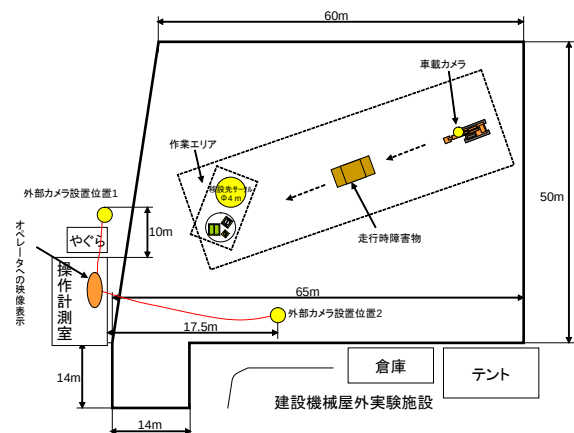


図-9 タスクモデルⅠによる実験配置図



写真-4 モデルタスク I による実験の状況（走行）

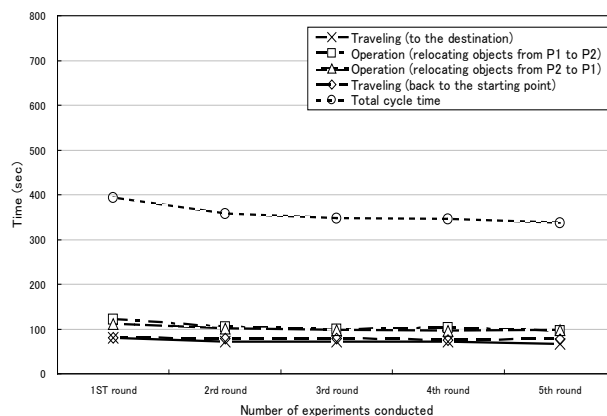


図-11 搭乗操作によるサイクルタイム



写真-5 モデルタスク I による実験の状況（作業）

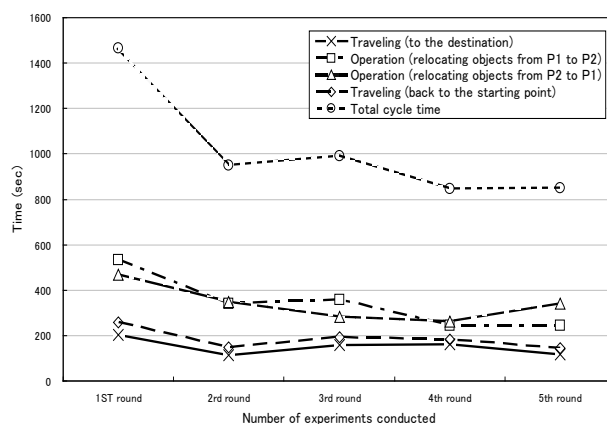


図-12 遠隔操作によるサイクルタイム

この実験は、機器の設置等の準備に2時間を要し、実験計測は1人のオペレータによる実験を4時間で行うことができた。

実験結果の一例が図-10, 11¹²⁾である。この実験では搭乗での建設機械の操作に比して無人化施工（遠隔操作）におけるサイクルタイムは約2.0倍であった。

なお、実験では、搭乗操作では概ね4～6分、遠隔操作では、概ね11～14分程度で実行されている。

4.1 モデルタスク II による実験及び結果

この実験は操作の慣れが効率に与える影響、特にオペレータの操作内容に関する学習過程を、操作の内容が操作回数によって変化する様子を調べることが目的として行ったものである。そのため、建設機械操作歴5年以上のオペレータ1名によりモデルタスク II に対して搭乗操作及び遠隔操作を各々10回実施し、その作業時間を計測した。実験フィールドと実験中の様子を図-12 及び写真-6, 7 に示す。

実験結果は、図-13, 14 に示すとおり、搭乗・遠隔操作ともに2回目以降よりサイクルタイムの落ち着きが見られた。ただし、作業時のサイクルタイムについては、遠隔操作時における回数毎のバラツキ差が顕著に現れる結果となった。また、搭乗操作と遠隔操作とサイクルタイム差は、遠隔操作は搭乗操作の1.65倍の作業時間であった。

実験では、機器の設置等の準備に2時間、実験計測には1人のオペレータにつき2時間で行うことができた。

この実験では、搭乗操作では2〜3分弱、遠隔操作では、3〜4分弱のサイクルタイムであり、タスクを数十回にわたって続けて実行できることが確認できた。

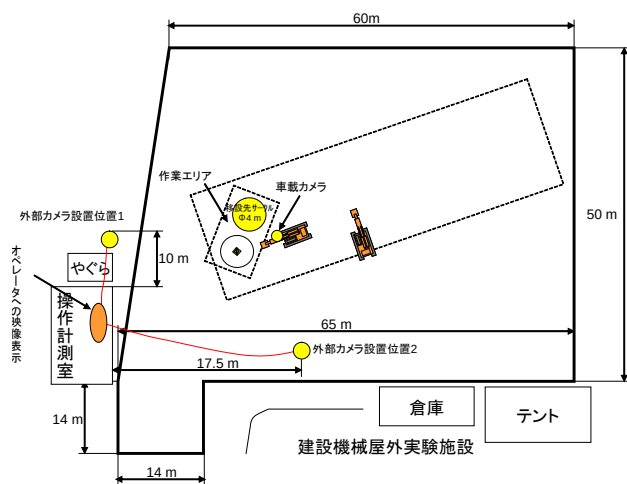


図-12 タスクモデルⅡでのフィールド概念図



写真-6 モデルタスクⅡによる実験の状況（走行）



写真-7 モデルタスクⅡによる実験の状況（作業）

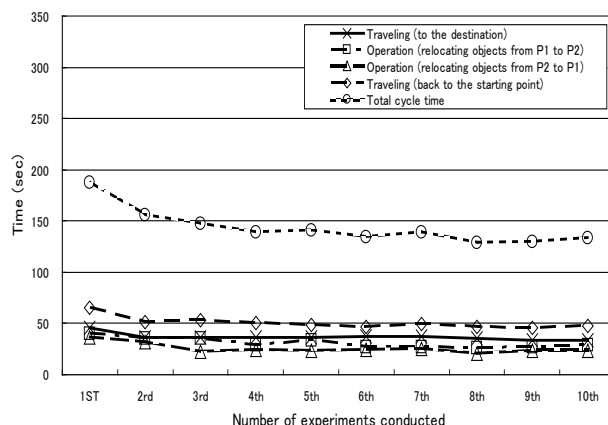


図-13 搭乗操作によるサイクルタイム

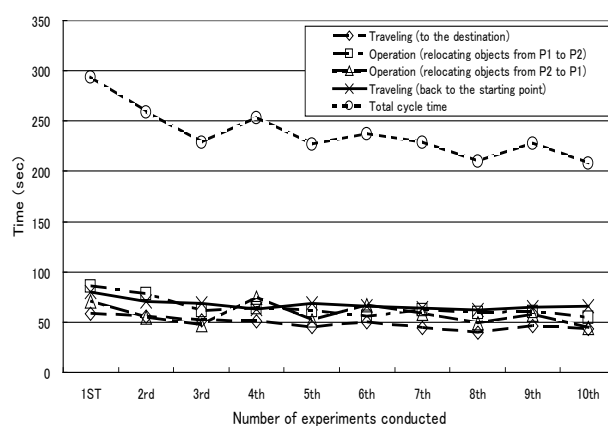


図-14 遠隔操作によるサイクルタイム

(3) 検証実験に基づくタスクモデルの妥当性

これらの実験では、求められた搭乗操作と遠隔操作による作業のサイクルタイム比は従来経験的に言われていた値に近く、この点では、実行したモデルタスクと実験は妥当なものであったと考えられた。モデルタスクⅠでは、それなりに複雑な作業を時間をかけて行っているため、計測された作業時間は安定している。それに対し、モデルタスクⅡでは、サイクルタイムが短く、繰り返しのタスク実行が容易であり、オペレータが作業に習熟して行く様子がそれなりに観察された。

この実験の結果は本稿で提示したモデルタスクの有効性を示しているものと言えよう。また、この実験では、提案したモデルタスクは、準備に要する時間が比較的短く、効率良い実験が可能であることを示している。

なお、これらの実験結果はいずれも、遠隔操作による作業の効率について具体的な作業と具体的な作業条件に対して計測したものとしても興味深いものであり、この結果については、更に検討を加えて別報にて報告する予定である。

5. まとめと今後の研究の方向

本稿では、無人化施工における遠隔操作の方式等を比較検証するうえで必要となる標準の指標となるモデルタスクを提案した。このモデルタスクは、特に実現場でのリアルな作業を再現したモデルであり、以下の性質を有している。

(1) 作業の標準性及び現実性

実作業現場では、掘削・積み込みや掴みなどの多岐に渡る作業が行われているが、基本操作のモデルを労働安全衛生法に基づく運転技能講習時に操作訓練するタスクをベースにすることによって、作業内容が現実から乖離せず標準的な作業要素となりタスクモデルとして妥当なものだと考えられる。

(2) 再現性

各タスクに使用する固形対象物を利用することによって同条件での作業が繰り返し実施でき、作業効率を公平に比較検証できるものと考えられる。

(3) 容易性

作業効率などを評価するための実験を行うにあたって、その準備も比較的容易にできる。また、タスクの実行時間も数分～十数分であって、それなりの繰り返しが可能である。従って、条件を変えて作業時間を比較することや、オペレータの習熟の様子を観察することが現実的な実験時間内で可能であり、多くの実験データを容易に取得するうえで効率的・効果的な手段になると考えている。

また、このモデルタスクによる実験の結果を示すことにより、その有用性を確認した。

このモデルタスクは、今後、建設機械の遠隔操作に関わる実験を行う場合での統一的な比較検証に役立つものと考えている。

今後、提示したモデルタスクを用いて、①人の知覚認知特性及び知覚情報と人の行動、②習熟のメカニズム(タスクの把握とフィールドのマッチング)、③疲労による作業効率の低減メカニズム、④安全を考慮したことによる作業効率の低減などの作業効率に関連する仮説の各々について、実験により検討を進めていきたい。また、それにより建設機械の遠隔操作をより搭乗操作の作業効率に近づけ、更に、その作業効率を向上させることを目的とした取り組みを進めていきたい。

参考文献

1) 久保田孝行, 湯浅祥次: 遠隔操縦ロボットのブルドーザへの適用について, 第10回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 133-142, 2004.

2) M.J.Lopatka, T.Muszynski: DETERMINING A DRIVE/STEER SYSTEM SKID STEER 6X6 WHEELER ROBOT LOAD,
 3) 建設無人化施工協会:HP(http://www.kenmukyou.gr.jp/f_j-irei.htm)
 4) 北原成郎, 時岡誠剛, 後藤誠: 高精度遠隔監視重機操縦システムの開発, 第8回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 1-8, 2000.
 5) 吉江宗生, 白井一洋, 田中敏成, 平林丈嗣: 港湾工事等へのロボット技術の導入, 第8回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 29-36, 2000.
 6) 西尾正巳, 平松雄二, 青野隆: 有珠山噴火災害緊急対策工事での無人化施工実績, 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 71-78, 2002.
 7) 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳: 長距離無人化施工技術の適用性に関する考察-雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要-, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 41-50, 2012.
 8) 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, pp. 89-96, 2010.
 9) キャタピラー教習所(株), 車両系建設機械運転者教本-整地・運搬・積み込み用及び掘削用-技能講習テキスト, 2013.
 10) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ootuki, Takeshi Hashimoto.: RESEARCH ON VISUALPOINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHINERY, The28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 532-537, 2011.
 11) 茂木正晴, 藤野健一, 西山章彦: 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-, 平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp. 19-24, 2012.
 12) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Akihiko Nishiyama.: RESEARCH ON OPERATORS' MASTERY OF UNMANNED CONSTRUCTION, The30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, USB No186, 2013.

STUDY ON QUICK AND SAFE CONSTRUCTION USING CONSTRUCTION MACHINES FOR THE LARGE-SCALE DISASTER

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2015

Research Team : Construction Technology Research
Department (Advanced Technology
Research Team)

Authors : FUJINO Kenichi

MOTEKI Masaharu

YUTA Shinichi

Yamaguchi Takashi

NISHIYAMA Akihiko

HASHIMOTO Takeshi

Abstract : Unmanned construction is used in Japan as an initial response in a disaster such as an earthquake or volcano eruption.

However, it is known that working efficiency of unmanned operation is lower than the efficiency of manned operation.

Until now, to improve efficiency, some new technology, such as imaging technology or the communication technology, were developed.

However, the new technology was evaluated with experience method, not a quantitative method. Because, it is difficult to evaluate the efficiency quantitatively.

In this report, a model task to evaluate efficiency in the unmanned operation is suggested.

The model task is similar to the real work at the construction site and can be done repeatedly. Through the experiment using the model task, the effectiveness of it was clarified.

Key words : Remote control, Disaster, Hydraulic excavator, Model task, Operational efficiency