

力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価*
(カメラ映像による遠隔操作ロボットシステムに
力覚提示機能を備えた場合の操作性評価)

山田 宏尚*¹, 加藤 英寿*², 土井 達也*³

Operational Evaluation of a Construction Tele-Operation Robot
with Force Feedback
(Evaluation of the Operation System with Video Image Display)

Hironao YAMADA*⁴, Hidetoshi KATO and Tatsuya DOI

*⁴ Department of Human & Information Systems, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193 Japan

This research examines a master-slave control system for a tele-operation construction robot. This system is comprised of two joysticks on the master side, which are used to perform the object operation from a remote location, and a robot arm with four degrees of freedom consisting of a fork glove, swing, boom, and arm on the slave side. The authors previously proposed a control method that gives the operator a realistic feeling of the force generated by the construction robot independent of the characteristics of the object being manipulated using the velocity-drive force characteristics of the actuator. However, that research did not reach a stage in which operability could be evaluated adequately when the control method was adapted to actual tasks. Due to the high adaptability of human subjects, there are cases in which adequate evaluation is difficult if only work efficiency is considered. Therefore, an evaluation that includes the mental strain on the operator is necessary. We believe that alleviating this mental strain can contribute to improved efficiency and safety in tele-operation work. In this study, we evaluated operability when this control method is adapted to an actual task, based on work efficiency, indexes expressing the danger level of an operation, and measurement of mental strain using NASA-TLX, and we verified the effectiveness of the control method.

Key Words: Construction Machinery, Robot, Hydraulic Actuator, Master-slave Control, Force Feedback, Maneuverability, Human Interface

1. 緒 言

原子力施設内や災害現場などのように、人間が直接立ち入ることが困難な極限環境下での作業では、人間が安全な場所からロボットを操作する遠隔操作が有効な手段となる。我が国では、雲仙普賢岳の噴火災害復旧工事に遠隔操作による施工(無人化施工)が本格的に導入されたことを契機として、これまでに多くの適用例が報告されている。そして、2001年には国土交通省が無人化施工を公共事業へ本格的に導入していくという方針を打ち出したことから、今後、無人化施工はより身近なものになると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。

現在、一般的に使用されている建設機械用の遠隔操作システムでは、建設機械の車載カメラなどによって得られる視覚情報のみを操作者に提示する手法が採用されている。当然のことながら、この方法では操作者に与えられる現場の情報量が不足し、その作業効率は直接操作と比べると少なからず劣るとの報告がなされている。このような場合、遠隔操作による作業を高度かつ安全に行うには、視覚情報に加え力覚情報を操作者へ提示することが重要となる⁽³⁾。

これまでに著者らは、ジョイスティック(以下、Jスティックと略記する)をマスタ、油圧パワーショベル(以下、建設ロボットと呼ぶ)の全駆動軸(フォーククラブ、スイング、ブーム、アーム)をスレーブとするマスタ・スレーブ系を対象として、作業感覚(物体の把持感覚など)を良好に提示できる制御法(以下、本制御法と呼ぶ)を提案した^{(4)~(7)}。しかし、本制御法

* 原稿受付 2007年4月27日。

*¹ 正員、岐阜大学工学部(☎501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

*² (株)デンソー(☎448-8661 刈谷市昭和町1-1)。

*³ 正員、岐阜大学大学院工学研究科。

E-mail: yamada@gifu-u.ac.jp

を実装した建設ロボットを実際の作業に適用した際の操作性を十分に評価するまでには至っておらず、より詳細な検討が望まれる。

そこで本報では、本制御報を実装した建設ロボットを実作業に適用し、その操作性を評価することで本制御法の有用性を検証する。しかし、操作性を評価する場合、人間の高い適応能力に起因して、作業効率だけでは十分な評価が困難な場合がある⁶⁾。このような場合、操作者が受ける精神的な負担なども含めた評価が必要となる。そこで本研究では、実際の作業に本制御法を適用した際の操作性を行動的指標、主観的指標、そして生理的指標によって、本制御法の有用性を検証する。

2. 遠隔操作建設ロボットシステム

図1に本研究で扱う遠隔操作・臨場感提示建設ロボット実験システムの概略図を示す。図示のように本システムは、マスタであるJスティックと、スレーブである建設ロボット（日立建機(株)製 LandyKID-EX5, 重量: 0.5 t）から成る。図2に示すように本システムは、通常の油圧パワーショベルと同様に JIS 規格に準拠した操作体系を採用した。Jスティックは左右一対（二台）から成り、それぞれ前後・左右に操作可能であり、1軸方向が1つのアクチュエータの駆動に対応している。本システムは四自由度のロボットアームとなっており、Jスティックの四方向の操作によって、ロボットアーム先端のフォークグラブ（以下、F グラブと略記する）を始め、スイング、ブーム、アーム駆動用の各油圧シリンダを動かす。F グラブによる物体の把持感覚や、スイング、ブーム、アームによる作業の際に発生する作業反力（力覚）を操作者に感知させるために、Jスティックには DC モータがそれぞれ二個内蔵されている。上記四本のシリンダ（カヤバ工業(株)製 Stroke Sensing Cylinder, 分解能: 0.01 mm）は、それぞれ比例制御弁によりフィードバック制御される。また、これらシリンダには、各ヘッド側およびキャップ側に圧力センサが設置されており、これにより各負荷圧力が検出される。これらの圧力信号は、マスタ側で必要とされる力覚信号として活用することができる。

3. マスタ・スレーブ系

本研究では、位置制御型を採用する従来のマスタ・スレーブ制御系の構成に基づきながら、広範な把持作業に対してその把持感覚を良好に提示できる油圧パワーショベルに

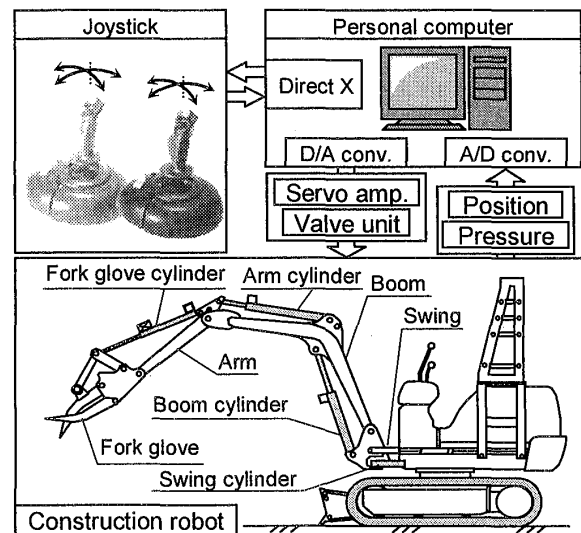


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

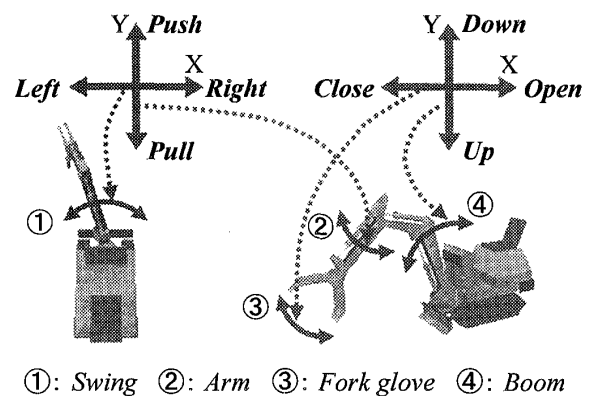


Fig.2 Control method of the construction robot in relation to the joysticks

適した制御法を提案した^{(4)~(7)}。本制御法の特徴は、以下の通りである。

- ① 反力を提示するための閾値 f_{prei} を、実測の速度-駆動力特性を活用することで可変とした。
- ② Jスティックへの反力を、マスタとスレーブの位置・速度偏差に依存する項と、ピストンの駆動力に依存する項によって構成した（位置対称型と力逆送型制御法を併用）。
- ③ Jスティックの変位に対して油圧パワーショベルのアクチュエータ速度が比例する市販の油圧パワーショベルの操作手法（速度制御型）とは異なり、本制御法ではJスティックの変位に対して建設ロボットのアクチュエータ変位が比例する位置制御型を採用する。

本制御法におけるJスティックへの反力 τ_{ri} と建設ロボットのアクチュエータへの制御入力 u_{si} を、それぞれ次の各式によって表す^{(6)~(7)}。 τ_{ri} , u_{si} などにおける添字

i は、F グラブ、スイング、ブーム、そしてアームに対応して $i=1\sim 4$ である。

$$\tau_{ri} = T_i \left[k_{pmi} (Y_{si} - Y_{mi}) + k_{dmi} (\dot{Y}_{si} - \dot{Y}_{mi}) + k_{tmi} f_{si} \right] \quad (1)$$

ただし、ゲイン T は次式によって与えられる。

$$T_i = \begin{cases} 0 ; & (|f_{si}| \leq |f_{prei}|) \\ \frac{f_{si} - f_{prei}}{f_{e_max} - f_{prei}} ; & (f_{si} > 0 \cap f_{si} > f_{prei}) \\ \frac{f_{si} - f_{prei}}{f_{e_max} - f_{prei}} ; & (f_{si} < 0 \cap f_{si} < f_{prei}) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{si} = k_{psi} (Y_{mi} - Y_{si}) + k_{dsi} (\dot{Y}_{mi} - \dot{Y}_{si}) \quad (3)$$

ここで、 Y_m , Y_s はマスタとスレーブの無次元変位、 f_s はピストンの駆動力、そして k_{pm} , k_{dm} , k_{tm} はマスタ系のゲイン、 k_{ps} , k_{ts} はスレーブ系のゲインである。なお、 f_{e_max} , f_{c_max} はピストンの伸びおよび縮み方向に対する最大駆動力を表す ($f_{e_max}=11.7\text{kN}$, $f_{c_max}=-6.8\text{kN}$)。

このように構成された本制御法を本システムに適用することで、固い対象物の把持や無負荷での開閉のみならず、比較的柔らかい対象物の把持作業に対しても本作業感覚を操作者へ良好に伝えることが可能となる。なお、ブームやアームは、測定された駆動力に重力などに起因した外力が含まれるため、負荷力を推定し実測の駆動力から差し引いたうえで本制御法を適用した。

4. 操作性評価実験

4.1 システムの構成 操作性評価実験において対象とするシステムの構成図を図3に示す。本システムは建設ロボットと視覚センサによって構成される遠隔地側（以下、建設ロボット側と呼ぶ）と、二台のモニターとジョイスティックによって構成される操作者側（以下、操作者側と呼ぶ）から成る。

まず建設ロボット側には、図示のように二台のカメラが設置されている。図中の Camera 1 では F グラブの拡大映像を取得し、Camera 2 では作業領域全体の映像を取得する。このような二台のカメラによって取得される画像の例を図4に示す。これにより、操作者は繊細な作業を行う場合には Camera 1 による映像（図4(a)）を見ながら操作し、大まかな作業を行う場合には Camera 2 による映像（図4(b)）を見ながら操作することができる。なお、このようなカメラの配置は、現

在实用化されている建設機械による無人化施工システムを参考にしたものである。

次に操作者側には、図示のように二台のモニターが設置されている。そして、操作者はこれらのモニターに映された映像を見ながら、ジョイスティックによって建設ロボットを遠隔操作する。なお、本研究では遠隔操作を模擬するために、操作者側を建設ロボット側が設置されている実験施設から隔離された場所に設置した。

4.2 作業内容 これまでに実施された無人化施工では、除石、破碎、運搬、ブロック積みなど、種々の作業が建設ロボットにより実施されてきた。これらの中でも、ブロック積み作業は他の作業とは異なり、高精度の位置情報が要求される繊細な作業である。そこで本研究では、①大学の実験施設内でも再現可能である、②三宅島泥流対策工事の際に遠隔操作によって実施された作業である、という二点から、操作性を評価するための作業として、このブロック積み作業を採用する。

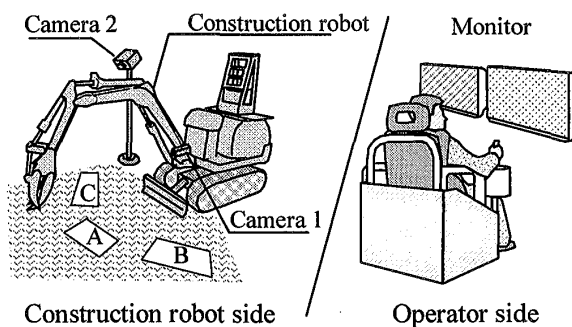


Fig.3 Experimental apparatus for evaluation of operational performance

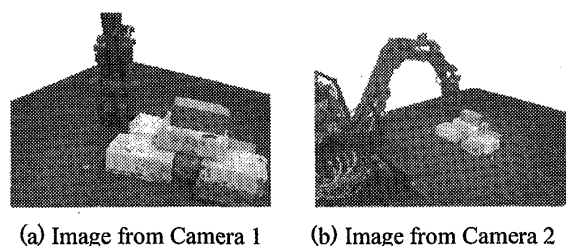


Fig.4 Obtained images from two cameras

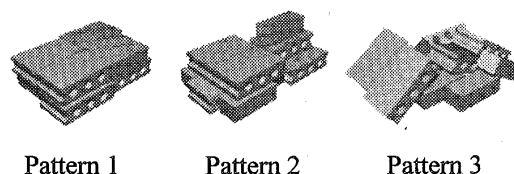


Fig.5 Placement of blocks

本研究で採用するブロック積み作業（以下、本作業と呼ぶ）では、初期状態として大小二種類のコンクリートブロック（合計 10 個）が建設ロボット側の A 領域に設置されている。なお、A 領域に設置されるブロックの配置パターンは、図 5 に示されるような三種類のパターンを準備した。そして、A 領域に設置されているブロックの中から大きなブロックを C 領域へ、小さなブロックを B 領域へ運搬し規則正しく積むという作業を実施する。

4・3 評価指標

4・3・1 行動的指標 行動的指標 (behavioral measures) は、主に作業成績のことを意味する。本研究では行動的指標として、作業効率と危険指標を用いる。それらの詳細は以下に示す通りである。

(1) 作業効率

A 領域に設置されたブロックを A 領域から B 領域および C 領域へ単位時間当りに運搬・整列したブロックの数 [Obj./min] を作業効率の指標とする。

(2) 危険指標

建設機械を使用した作業現場において発生する事故の約半数は油圧ショベルによるものと言われ、その中には転倒事故も多数含まれると報告されている。このような状況に陥る主な原因は、建設機械のフロント部が地面や対象物に接触しているような不安定な状況にも関わらず作業を継続することによるものといわれている。そこで、このような状況を表すために本研究では、危険指標として次に示す二つの指標を用いる。

- ① フロント部が地面や対象物に接触し、建設ロボットが不安定な状態に陥っている時間 t_c 。（以下、接触時間と呼ぶ）
- ② 建設ロボットが不安定な状態に陥っている間に、ロボットのブーム、アーム、スイングが発生した力の平均値 F_c 。（以下、平均発生力と呼ぶ）。

上記の危険指標 t_c 、 F_c を算出するための概念図を図 6 に示す。なお、図中の横軸は時間、縦軸はブーム、アーム、スイングが過度に発生した力の和 F_t を示す。ここで、地面などに接触した際にピストンが発生する過度の力は、作用反作用の関係からピストンに作用する外力と等価なものとして扱うことができる。そこで、先述のゲイン T を導入することで、個々のピストンが過度に発生した力を無次元表示することができ、これらを合計することで発生力 F_t が得られる。以上によって得られる発生力 F_t に対して、図中の破線によって示されるような閾値を設定し、この閾値を超えたときを不安定な状況とみなす。図によれば、 t_1 を除く各区間において発生力 F_t が設定された閾値を超えているた

め、接触時間 t_c は $t_2 \sim t_4$ の各区間の合計によって得られる。また平均発生力 F_c は同区間の発生力 F_t の積分値を接触時間 t_c で除すことで得られる。

4・3・2 主観的指標 これまでに精神的作業負荷の評価を目的として、幾つかの心理指標が開発された。しかし、現在では SWAT (Subjective Workload Assessment Technique) や NASA-TLX (NASA Task Load Index) が広く用いられているが、本研究では適用例が多く、また導入も容易な NASA-TLX を主観的指標として採用する。

NASA-TLX は、精神的要求、身体的要求、時間的要求、作業成績、努力、フラストレーションの六つの尺度によって構成されている。NASA-TLX による評価の流れは主に、①各尺度に対する一対比較、②負担度評価の対象となる作業（本稿では、ブロック積み作業）、③各尺度に対する負担度評価、という三つの行程によって構成されている。

先ず、各尺度に対する重要度を一対比較によって評価する場合、その組み合わせは 15 通りあるため、被験者はこれらの 15 組に対して、「より重要」と考える尺度を選択していく。そして、この 15 回の一対比較の中で「より重要」と選んだ回数（最大 5、最小 0）が、後述の負担度評価に対して与えられる尺度の重みとなる。なお、一対比較によって得られる重みは負担度評価の結果に大きな影響を与えることから、本研究ではこの一対比較を二回実施した。また、一対比較を実施する際に参考とする各尺度の説明文として、芳賀ら⁹⁾によって開発された日本語版 NASA-TLX を基本として、本研究で行う評価に合わせて変更を加えた。表 1 には、実験で用いた NASA-TLX の各尺度とその説明文を示す。

実験では、先述のブロック積み作業を行うが、その際、作業に対して制限時間を設けた場合、焦り・急ぎ・慌ての心理状態が生じ、このような状態での作業はエラーを多く含むと言われている。このような心理状態は負担度評価に悪影響を及ぼすものと考えられることから、本研究では制限時間を設けずに作業を行った。

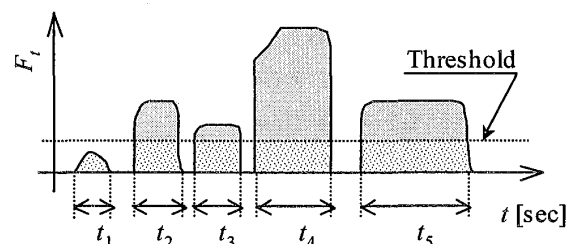


Fig.6 Basic concept of risk measurement

最後に、ブロック積み作業を終えた後、被験者は六つの尺度に対して0~100の範囲で評価値を付ける。なお、各尺度に対する評価値は0に近いほど負担が軽いことを意味する。そして、六つの尺度に対する評価値と先述の一対比較によって得られた重みを加重平均することで、総合的な評価値であるWWL得点(Mean weighted workload score)が得られる。

Table 1 Expository writing of improved NASA-TLX

Title	Description
Mental Demand	<ul style="list-style-type: none"> How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking searching, etc) to control the construction robot? Was the Task Easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?
Physical Demand	<ul style="list-style-type: none"> How much physical activity was required (e.g., turning, controlling, activating, etc.)? Was the Task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious
Temporal Demand	<ul style="list-style-type: none"> How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the task or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?
Performance	<ul style="list-style-type: none"> How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter?
Effort	<ul style="list-style-type: none"> How hard did you have to work to accomplish your level of performance? How hard did you have to work(mentally and physically)to accomplish your level of performance?
Frustration Level	<ul style="list-style-type: none"> How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?

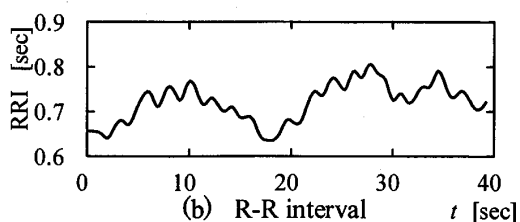
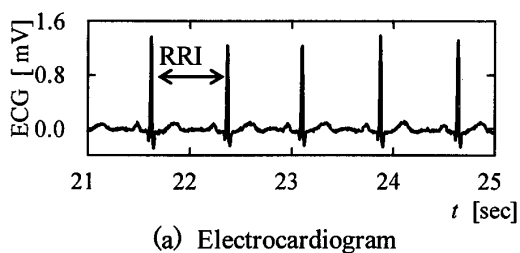


Fig.7 Electrocardiogram and R-R interval

4・3・3 生理的指標 人が精神的な負担を受けるとき、心拍、脳波、末梢皮膚温、呼吸などの生理反応に変化が生じることが知られている⁽¹⁰⁾。これらの中でも心拍数変動(HRV: Heart Rate Variability)は精神的な負担をよく反映すると言われている。そこで本研究では、精神的な負担を評価するための生理的指標として心拍数変動を計測する。

心電波形(Electrocardiogram)は、胸部の三カ所に電極を貼って測地する胸部双極誘電法によって計測される。これにより計測された安静状態における心電波形の例とR-R間隔(RRI: R-R Interval)を図7に示す。図7(a)によれば、周期的にピークが現れている。これはR波と呼ばれるもので、血液を左心室から大動脈に送り出す際に生じる。そして、この心電波形から得られるR波の間隔の変動状況を図7(b)に示す。図によれば、安静状態におけるR-R間隔は大きなゆらぎを持って変動している。一般的に、安静状態でのR-R間隔は大きなゆらぎを持って変動し、緊張や不安の状況ではその変動が減少すると言われている。したがって、安静状態における図7(b)の結果は妥当であると判断される。

心電波形から心的事象の動きを捉えるために、R-R間隔データを高速フーリエ変換などによってスペクトル解析する手法が広く用いられている。しかし、本研究では評価実験の際の作業時間が短いことから、自ずとR-R間隔のデータ数が少なくなり、スペクトル解析が困難であった。そこで本研究では、少ないデータからでも十分な評価が可能であるといわれる心拍変動係数 CV_{R-R} (Coefficient Variability of R-R)を用いる⁽¹¹⁾。これは、R-R間隔の平均値と標準偏差によって表現される指標であり、安静状態では大きな値を示し、緊張や不安といった心理状況では小さな値を示す。なお、 CV_{R-R} には年齢差や個人差があるため、被験者ごとに式(4)に基づいて正規化した CV'_{R-R} を生理的指標の評価値として用いた。

$$CV'_{R-R} = \frac{CV_{R-R} - CV_{min}}{CV_{max} - CV_{min}} \quad (4)$$

なお、式中の CV_{min} および CV_{max} は、過負荷時および安静時に計測された CV_{R-R} 値である。

5. 実験

本実験では、本制御法による力覚提示機能を実際の作業に適用した際の有用性について検証する。そこで本章では、先述のブロック積み作業を実施したときの

行動的指標, 主観的指標, 生理的指標を示す。なお, 被験者は八名 (全て男性: 平均 24 歳) であり, いずれも市販の速度制御型による油圧パワーショベルの操作経験は無いが, 位置制御型を採用する本実験システムについては十分な練習を行った後, 実験を開始した。実験は長時間 (一人当たり約四時間) に及ぶため, 被験者の疲労を考慮して二日間に分けて実験を行った。

5・1 行動的指標

(1) 作業効率

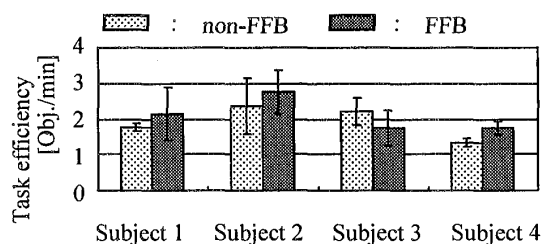
作業効率に関する結果として, 被験者ごとの作業効率とその標準偏差を図 8 に示す。図中の "non-FFB" が力覚を提示しなかった場合, "FFB" が力覚を提示した場合を意味する。また, 横軸は被験者, 縦軸は作業効率 [Obj./min] を示し, この縦軸値が大きくなるほど作業効率が高いことを意味する。なお, 被験者は実験開始前に十分な練習を行った。図によれば, 力覚提示の有無による有意な差は認められない。その主な原因として, 2 台のカメラ映像を被験者に提示しており, そこから作業のための十分な位置情報を得ることができる環境であったからと考えられる。加えて, 後述の危険指標に関する結果より, 被験者は力覚情報を基に慎重な操作を行ったため, 作業効率が高くならなかったものと考えられる。

(2) 危険指標

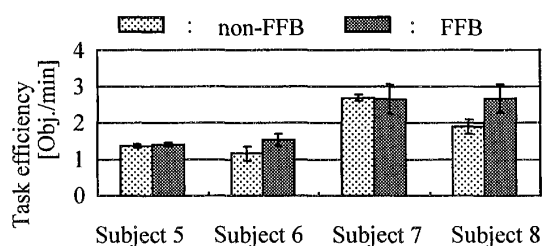
危険指標に関する結果として, 被験者ごとの接触時間 t_c と平均発生力 F_c を図 9 に示す。図中の左縦軸は接触時間 t_c , 右縦軸は平均発生力 F_c を表し, それぞれが小さくなればより安全に作業できていることを意味する。図によれば, 被験者ごとに若干の差が認められるものの, ほとんどの被験者において力覚を提示することで接触時間 t_c と平均発生力 F_c が減少している。この理由は, カメラからの映像のみでは危険性についての判断が困難な状況でも, 力感覚を提示することで建設ロボットの状況を力感覚として直感的に把握できたことによるものと考えられる。

5・2 主観的指標 図 10 には NASA-TLX の結果を示す。なお, NASA-TLX は主観的な評価手法であることから, それぞれの被験者の習慣や判断基準によって各尺度に対する評価基準が異なるため, 被験者全員の平均値による評価は困難となる。実験結果によれば, 八名の被験者の結果はほぼ同様の傾向を示したことから, 図には被験者全員の平均ではなく代表的な例として四名の結果を示した。なお, 図中の△印が力覚を提示しなかった場合, ●印が力覚を提示した場合の各尺度に対する評価値である。図によれば, 力覚を提示した場合には各評価値や総合的な評価値である WWL 得点が小さくなっていることから, 被験者への精神的な

負担が軽減されていることが分かる。また, 全被験者の傾向から推して, 力覚を提示した場合には, 知覚的要求 (MD), 努力 (EF), フラストレーション (FR) の各尺度に対する負担が軽減されることが分かった。特に新しい操作システムを評価する場合には努力 (EF) のみを評価指標と考える場合が多く, 努力が軽減されるということは, 作業全体の負担が軽減された

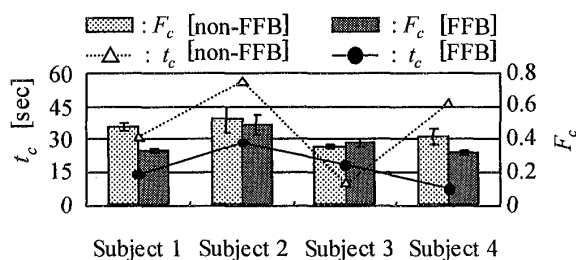


(a) Task efficiency (Subject 1~4)

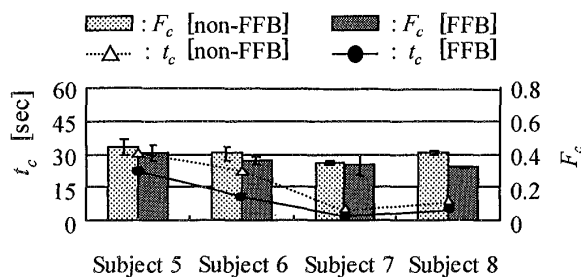


(b) Task efficiency (Subject 5~8)

Fig.8 Task efficiency in behavioral measures



(a) Risk measurement (Subject 1~4)



(b) Risk measurement (Subject 5~8)

Fig.9 Risk measurement in behavioral measures

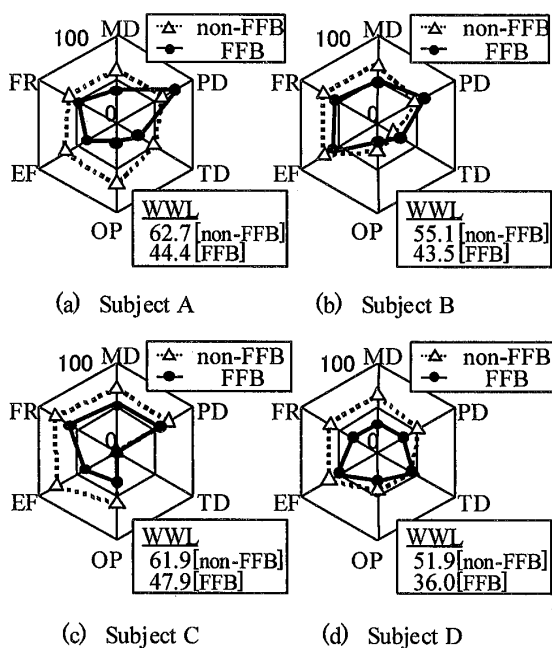


Fig. 10 NASA-TLX in subjective measures

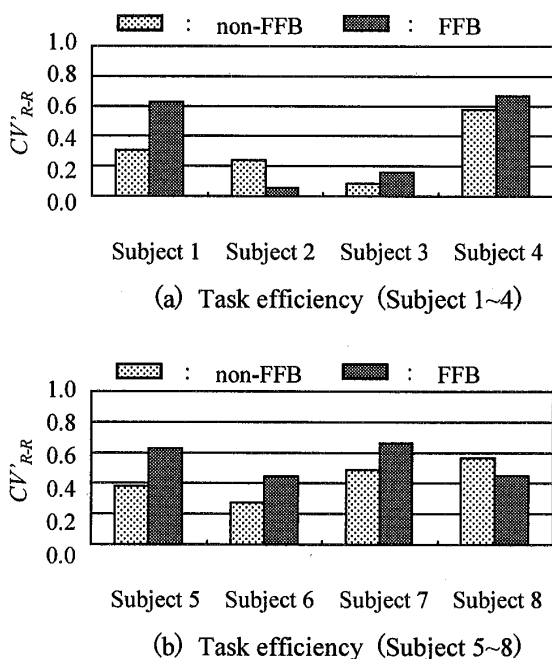


Fig. 11 Coefficient variability of R-R in physiological measures

ということにもつながる。この理由として、建設ロボットの状況を視覚のみでは捉えることが困難な場面においても、提示される力感覚によって作業感覚の情報を補うことができ、これにより精神的な負担を軽減できたことによるものと考えられる。

5・3 生理的指標 図 11 には被験者ごとの心拍変動係数の結果を示す。なお、横軸は被験者、縦軸は CV'_{R-R} を示し、この縦軸値が小さくなるほど被験者への精神的負担が大きいことを意味する。図によれば、被験者ごとに CV'_{R-R} 値の大きさは異なるものの、ほとんどの被験者において力覚を提示した場合は、力覚を提示しなかった場合と比較して CV'_{R-R} 値が若干大きくなっている。したがって、力覚を提示することで心的負担が軽減され得るということが分かる。この理由として、視覚情報のみでは作業が困難な場面でも力感覚を提示することで作業の状況がより把握し易くなったことによるものと考えられる。

6. 結 語

本研究では、視覚情報として複数のカメラ映像を用いた建設ロボットの操作システムに対して提案した力覚提示手法を適用し、その有用性を被験者を介して客観的に評価した。その際、操作性を評価するための作業として、実用の遠隔操作で採用された作業であること、さらに除石などの作業と比べて難度が比較的高いことなどを考慮して、ブロック積み作業を採用した。また、評価に際して、人間の高い適応能力に起因して行動的指標だけでは十分な評価が困難となる場合があることから、一般的な評価指標である行動的指標に加えて、主観的指標、生理的指標の三種類の指標によって評価を行った。その結果は、次のように要約される。

- (1) 作業効率の点では、カメラ映像から十分な位置情報が得られたことなどにより、力覚提示による有意な差は認められなかった。しかし、危険指標の点では、力覚を提示することで作業状況を力感覚として把握することができ、作業を安全に実施できることが確認された。
- (2) 主観的指標に関しては、力覚を提示することで視覚情報のみでは捉えることが困難な建設ロボットの状況を力覚によって容易に把握することが可能となり、その結果、精神的な負担を軽減できることが確認された。
- (3) 生理的指標に関しては、力覚を提示することで(2)と同様の理由により、ほとんどの被験者に対して精神的な負担を和らげ得ることが確認された。

以上の結果から、カメラ映像を用いた遠隔操作システムに対して力覚提示機能を付加することで、ロボット操作をより安全に実施できるばかりでなく、操作者への精神的な負担を軽減できることが確認された。

文 献

- (1) Muramatsu, T., Construction using Information Technology and a future trend Vol.1 (*in Japanese*), *Construction Machinery*, Vol. 38, No. 1(2002), pp.8-19.
 - (2) What's new about Movement of the River Bureau(*in Japanese*), PORTAL, foundation river information center, No.11(2001).
 - (3) Kanno, S., Okada, T., Kitahara, S., Unmanned construction technology by remote control (*in Japanese*), *The mechanization of construction*, No.8(1994), pp.17-20.
 - (4) Yamada, H., Takeichi, K., Muto, T., Master-Slave Control for Tele-Operation Construction Robot System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 66, No.651 (2000), pp. 3664-3671.
 - (5) Kato, H., Yamada, H., Muto, T., Master-Slave Control for a Tele-Operation System of Construction Robot, *Proceeding of the 5th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Vol.2 (2002), pp.513-518.
 - (6) Kato, H., Yamada, H., Muto, T., Master-Slave Control for a Tele-Operation System of Construction Robot, *Transactions of the Japan Fluid Power System Society*, Vol. 34, No. 2 (2003), pp.27-33.
 - (7) Kato, H., Yamada, H., Muto, T., Master-Slave Control for a Tele-Operation System for a Construction Robot(2nd Report : Expansion of Force Feedback to Articulated Arm by Gravity Compensation), *Transactions of the Japan Fluid Power System Society*, Vol. 34, No. 4 (2003), pp.85-91.
 - (8) Ebe, K., Okuwa, M., Inagaki, H., Evaluation of Driver's Mental Workload Due to Visual and Auditory Cognition, *R & D Review of Toyota CRDL*, Vol. 34, No. 3(1999), pp.55-62.
 - (9) Haga, S., *Theory and Measurement of Mental Workload (in Japanese)*, (2001), pp.39-46, Japan Publication Service.
 - (10) Naito, H., Murai, K., Hayashi, Y., A Basic Study on Characteristics of Sequential R-R Intervals, *Review of Kobe University of Mercantile Marine. Part II*, No. 50 (2002), pp.13-18.
 - (11) Kato, Z., Okubo, T., *Measurement Method of Biological Functions for a beginners (in Japanese)*, (1999), pp.194-195, Japan Publication Service.
-