

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330233

研究課題名(和文) 遠隔操作油圧パワーショベルの高精度力覚提示法の開発

研究課題名(英文) Development of Precise Force Presentation Method for Tele-operated Construction Robot

研究代表者

山田 宏尚 (Yamada, Hironao)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80240034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：地震や火山，原子力発電所における災害復旧等で利用される建設ロボットでは，パワーショベル等多用される．本研究では，汎用的なパワーショベルに小規模な改良を加えることで，力覚フィードバックを可能とし，作業対象物や地面に対する操作で生じる微妙な作業反力を操作レバーおよび映像・音声情報を用いて作業者にフィードバックするとともに，対象物を破壊せずに安全にハンドリングするための力覚および動作状況提示に関する研究を行った．実験により検証した結果，災害復旧で活用される油圧パワーショベルを用いて，対象物を破壊せずに安全にハンドリングするための力覚提示・制御法に関する研究成果を得ることができた．

研究成果の概要(英文)：Teleoperation system for construction robot (hydraulic shovel) is effective to work in hazardous environment. In this research we developed a control method to provide an operator with a realistic sensation of grasping by introducing a noticeable reaction torque to the joystick's handling and a variable master torque gain according to an object's hardness. Additionally, we proposed a presentation method of soil strength and warning system as a new feature expansion of the system. To evaluate the proposed system, operability tests were conducted when the control method was introduced to actual tasks, including grasping, conveying and classifying tasks using concrete blocks and sponge foam blocks. According to statistical analysis of the experimental results, we verified that the developed method used in the operation system could contribute to improving efficiency and safety during teleoperation work as well as alleviating the operator's mental fatigue and stress.

研究分野：機械工学

キーワード：ヒューマンインタフェース 遠隔操作 力覚提示 建設機械 油圧パワーショベル

1. 研究開始当初の背景

地震や火山，原子力発電所における災害復旧等で利用される建設ロボットでは，油圧式建設機械（パワーショベル等）が多用される．しかし，現在汎用されているパワーショベルでは作業者が対象物をハンドリングする際の微妙な力感覚が分からないため，作業対象物を破壊せずにハンドリングすることが難しい．当研究室では，これまでに災害復旧等における無人施工で用いることを想定した，研究用の遠隔操作建設ロボットシステムを構築し，操作レバーと油圧シヨベル間のマスター・スレーブ制御の基礎的検討，揺動装置を用いて作業者にパワーショベルの傾きや振動などの運動を体感により伝える手法の検討および作業現場の状況を効果的に作業者側に伝えるための視覚提示法に関する検討をおこなってきた．しかし，対象物からの微妙な作業反力を高い精度で作業者にフィードバックし，壊れやすい対象物であっても安全にハンドリングできる災害復旧作業のための要素技術の開発が望まれていた．

2. 研究の目的

本研究では，汎用的なパワーショベルに小規模な改良を加えることで，力覚フィードバックを可能とし，作業対象物や地面に対する操作で生じる微妙な作業反力を操作レバーおよび映像・音声情報を用いて作業者にフィードバックするとともに，対象物を破壊せずに安全にハンドリングするための力覚および動作状況を提示できるシステムの開発を目指した．作業者への情報提示においては，操作レバーのみならずビデオカメラ画像にCG（コンピュータ・グラフィックス）による付加情報を重ねて表示するAR（Augmented Reality：拡張現実）を導入した．そして，開発したシステムの有効性を，シミュレーションおよび実験により検証することを目的とした．

3. 研究の方法

本研究では，図1に示す油圧パワーショベルの遠隔操作システムを改造して研究を実施した．本システムでは，図のように左右一対（二台）の操作レバー（Joystick）を用いて，パワーショベルのアームを前後・左右に操作する．すなわち操作レバー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ことができる．

本研究では，金属配管などのデリケートな対象物の硬さを従来システムよりも精度良く計測し破壊せずにハンドリングする方法を開発した．



図1 実験システムの概要

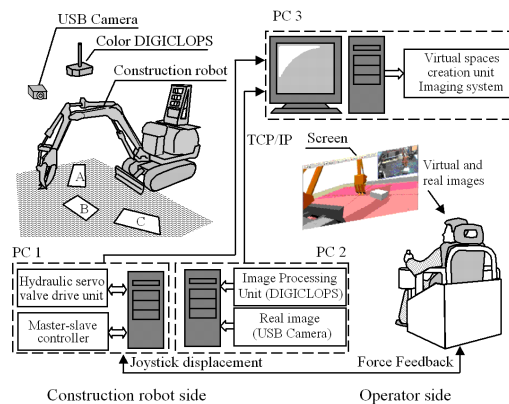


図2 遠隔操作システム

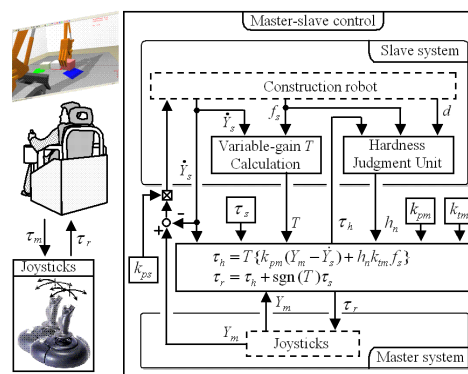


図3 提案した可変ゲイン制御法

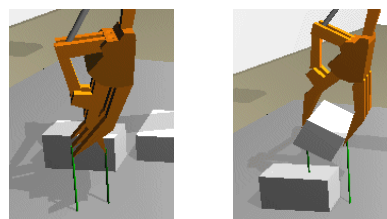


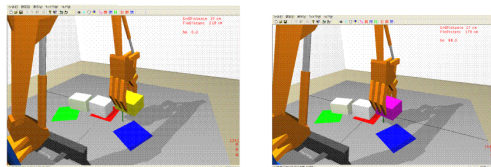
図4 ARによる補助ゲージ表示

操作レバーに微妙な作業反力を提示する場合、壊れやすいものや柔らかく変形しやすい対象物を把持したときの力情報を感じながら操作者が正確に作業対象物を落とさずに運搬することは作業者にとって大きな負担となる。これは操作レバーの操作に対して、操作力がそれを阻害するからである。

そこで図2に示すシステムを用いて操作レバーからの力覚フィードバックを必要最小限に抑えつつ、対象物からの反力に基づく聴覚情報および視覚情報をフィードバックすることで、微妙な力覚の認識を可能にする手法について検討した。

まず、操作レバーからの力覚フィードバックに関しては、位置-速度制御では操作レバーに変位を加えなければ操作レバーへの反力が生じないため、対象物を把持して操作レバーを中立点に戻すと力提示が出来ないという問題を有する。そこで、中立点近傍では制御法を従来の位置-位置制御法に切り替える手法を採用した。さらに、聴覚による力覚フィードバックでは、対象物からの反力を油圧シリンダ内の圧力センサで計測し、本研究で提案した図3に示す可変ゲイン制御法を用いて摩擦力等の外乱を補正した後、操作レバーへの力覚提示に加えて、作業反力の強さにより音程の異なるピーブ音を操作者にフィードバックし、操作レバーへの力提示を支援した。

また、ビデオ映像のみを用いた遠隔操作では現場の状況を十分に把握できず、作業効率や安全性に悪影響を与える可能性が考えられる。そこで、ビデオカメラ画像にCGによる付加情報を重ねて表示するARを導入し、CGにより視覚的に力覚情報を提示した。操作者には、プロジェクタにより投影されたビデオ映像を提示し、実写映像にCGによる力覚情報を含む作業支援情報を提示した。すなわち、操作者がパワーショベルにより作業対象物を把持すると、作業対象物からの反力を図4に示すようにCGによるゲージで提示すると共に、図5に示すように作業反力と油圧アクチュエータの変位より対象物の硬さ情報を計算し、硬さに応じた色を作業対象物に着色して提示した。



(a) 柔らかい対象 (b) 硬い対象

図5 ARによる力情報表示

上記に加え、地面硬さ視覚化システムに関する検討を行った。すなわち、本研究で開発した手法により得られた地面硬さ情報を、図6に示すようにARを用いてビデオ映像に重

畳表示する地面硬さ視覚化システムを開発した。

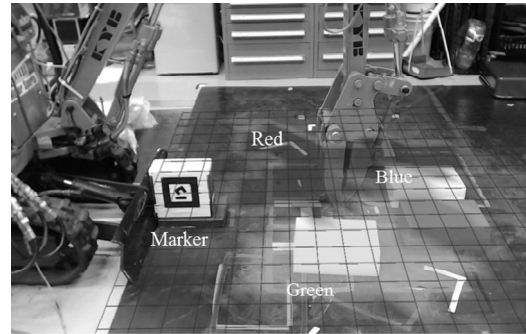


図6 地面硬さ提示

さらに、油圧パワーショベルを用いて、対象物を破壊せずにハンドリングするため、油圧操作レバーの解析および、視角・聴覚情報提示に関する検討を行った。

4. 研究成果

本研究では、操作反力は必要最低限にとどめ、その代わり視覚および聴覚情報を用いた力提示を補助的に援用することにより、より効果的な作業支援法の開発を行い、行動的指標、主観的指標、生理的指標による評価を行い、その有用性を評価した。

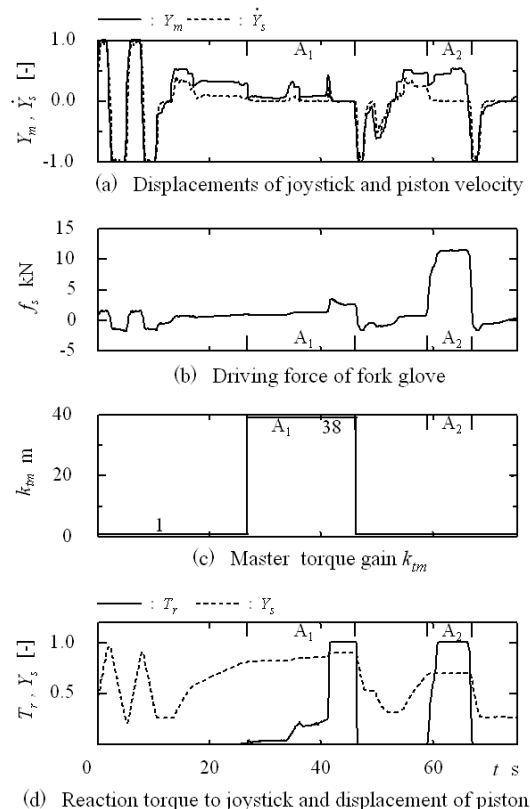


図7 油圧パワーショベルによる物体把持結果

図7に本研究で開発したマスタ・スレーブ制御法を用いて、柔らかいスポンジブロックおよび硬いコンクリートブロックを順に把持した場合の一例を示す．図中 (a) はジョイスティックの変位とフォークラブ開閉シリンダの速度を示し，ジョイスティックの位置とシリンダ速度がほぼ比例して同期していることが分かる．図 (b) はフォークラブにおける駆動力，(c) はマスタ・スレーブにおける対象物の硬軟に応じて変化するゲイン k_{tm} ，(d) はジョイスティックへの反力 (実線) およびピストン変位 (破線) を示す．本実験では，40秒前後においてきわめて柔らかいスポンジブロックを把持している．従来の制御法ではこのようなソフトな対象物からの作業反力はジョイスティックに提示できなかったが，本研究で開発した手法では図 (d) の実線のように明確に反力提示ができています．これは，シリンダ変位と圧力に基づき図 (c) のようにゲイン k_{tm} が切り替えられることによって，微小な反力を十分に拡大し，ジョイスティックに提示できることを意味する．また，60秒付近ではコンクリートブロックを把持しているが，このときは大きな反力が得られるため，対象物を硬いものと自動判別し，適切な反力をジョイスティックに提示できている．

さらに，上記で提案した対象物の硬さ検出法を用いて，作業対象物の硬さを図5のようにCGを用いて画像提示する方法を用い，複数の被験者に対して対象物の運搬・仕分け作業を行ってもらい，行動的指標，主観的指標，生理的指標による評価を行い，その有用性を評価した．

図8は，行動的指標を作業効率の観点から評価した一例 (作業者1～5)を示す．図中の k_{tm} が Constant は従来の手法を，また Variable は対象物の硬さに応じてゲイン k_{tm} を変化させる本研究の提案手法を示す．この結果より，提案手法のほうが全般的に作業効率が高くなっており，行動的指標の面での有効性が確認できる．

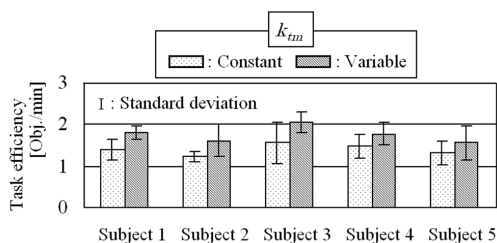


図8 作業効率に基づく評価

図9は，行動的指標を危険指標の観点から評価した一例 (作業者1～5)を示す．危険指標は，地面をフォークラブで力 F_c で押しつけて，油圧ショベルの姿勢が不安定になる状況を危険として定義し棒グラフで表し，その時間平均を t_c (折れ線) により表した．図中の k_{tm} が Constant は従来の手法を，また

Variable は対象物の硬さに応じてゲイン k_{tm} を変化させる本研究の提案手法を示す．この結果より，提案手法のほうが全般的に押しつけ力および危険となる時間が短くなっており，提案手法の有効性が確認できる．

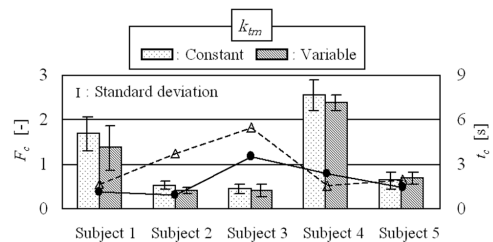


図9 危険指標に基づく評価

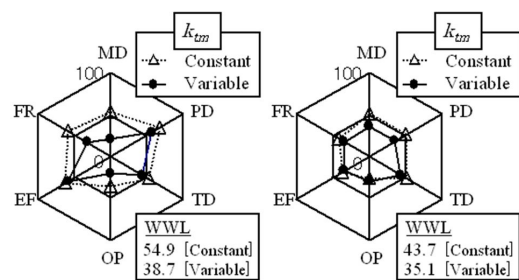


図10 主観的指標に基づく評価

図10は，行動的指標を NASA-TLX と呼ばれる主観的指標の観点から評価した一例 (作業者1，2)を示す．図のレーダーチャートではそれぞれの値が小さいほどメンタルワークロードの負荷が少ないことを示し，わずかではあるが本研究で提案した可変ゲインによる制御手法の方が精神的な負担も少なくなっていることが分かる．

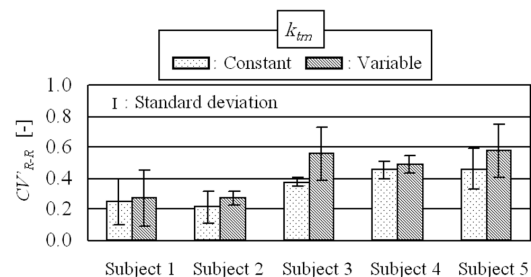
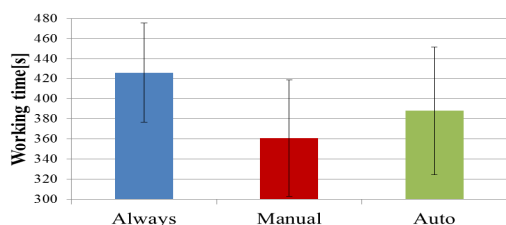


図11 生理的指標に基づく評価

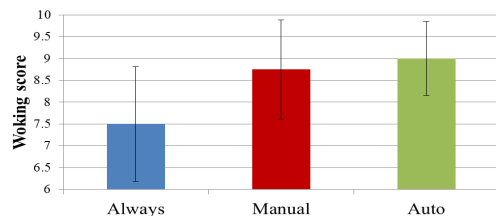
図11は，生理的指標として，心電図に基づく CV^2_{R-R} を用いて評価した一例 (作業者1～5)を示す． CV^2_{R-R} の値が小さいほど生理的に緊張していることを示すが，図より提案手法の方が全般的に緊張感が少ないことがわかる．これは従来法ではソフトな対象を把持したときの感覚がジョイスティックから判別できないため操作に緊張感を伴うことが原因であると考えられる．

以上の結果より，本研究で提案された手法の有効性が確認された．

本研究では、上記で有効性を確認した把持対象物の硬さ自動計測手法を、地面硬さ視覚化システムに応用した。すなわち、計測された地面硬さ情報を、図6に示すようにARを用いてビデオ映像に重畳表示する地面硬さ視覚化システムを開発しその有効性を確認した。硬さ情報の重畳提示を行うと作業環境(障害物の有無、現場の色など)の把握がしづらくなる傾向がみられた。そこで、硬さ情報と作業環境情報の両立が可能となる、最適な地面硬さの提示方法の検討を行った。すなわち、ARを常に表示(常時提示)、AR表示・非表示を手動で切り替える(手動切替)、同表示を自動で切り替える(自動切替)の3手法を用意し、それらを被験者によるブロック運搬作業実験で比較・評価した。図12(a)に各被験者の作業時間を平均した結果を示し、同図(b)に作業精度を平均した結果を示す。



(a) 作業時間の平均



(b) 作業精度の平均

図12 作業時間および作業精度

この結果より、ARの表示・非表示を切り替えることで作業時間、作業精度が向上することが分かる。以上により、硬さ情報を用いた作業が可能であり、表示切替を用いることで作業時間と作業精度の低下を抑制できることが確認できた。

さらに、建設機械の操作によって生じる反力の力学的原理の解明および、オペレータの操作感覚の定量化をおこなうために、静力学モデルに基づく反力の解析シミュレーションを構築した。そして、その妥当性を評価実験とME法による官能評価によって検証したところ、両者には同様の傾向が得られることを確認できた。また、遠隔操作における建設機械への負荷低減を目的として、建設機械への力学的負荷の程度を表す指標を定義し、ARを用いてそれを操作者に視覚的に提示した。そして、本システムの有効性について作業精度、作業効率、乱暴指数、精神的負荷、アンケートを用いた官能検査の観点より、検証した結果、乱暴度の改善が確認され、精神的負荷については増加しなかったことから本シ

ステムの有用性が確認された。続いて、遠隔操作時の操作者に、建機の動作状況を伝えるため、フォークグラブの手先が危険物体に接近した際に、操作者へ警告を行う危険物回避警告システムを構築した。そして、力覚および音による2つの提示手法について、実験により作業情報提示の有効性を検証した。その結果、危険指数により、危険物体の回避という点で、力覚提示に比べ音提示が役立つこと、精神負担の観点で、警告を提示しない場合と比較して、力覚提示の有効性が示された。

以上の結果より、本研究では災害復旧で活用される油圧パワーショベルを用いて、対象物を破壊せずにハンドリングするための力覚提示・制御法に関する研究成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計2件)

服部勇士, 大坪克俊, 川村拓也, 山田宏尚, ARを用いた遠隔操作建設ロボットの負荷軽減, 日本機械学会東海支部第60期講演会, 2016,317 (CD-ROM).

岡田史親, 大坪克俊, 川村拓也, 山田宏尚, 建設ロボット用油圧操作レバーに関する研究, 日本機械学会東海支部第60期講演会, 2016,318 (CD-ROM).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 宏尚 (YAMADA HIRONAO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 80240034

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし