解 説

建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース

Human Interface of a Tele-operated Construction Machine

山 田 宏 尚* 岐阜大学

Hironao Yamada* *Gifu University

1. は じ め に

我が国は地震や津波、火山噴火による火砕流、台風や集中豪雨による土石流や崖崩れ等の自然災害が多く、災害発生後は迅速な対策を実施する必要がある。このような災害現場や原子力発電所などの人間が立ち入るには困難かつ危険な場所における機械作業では、遠隔操作が有効な手段となる。

当研究室では遠隔操作建設ロボットシステムを構築し、そのヒューマンインタフェース改善のためにVR (Virtual Reality: バーチャル・リアリティ) 技術を導入してオペレータに作業現場の十分な臨場感を与えるとともに、コンピュータの支援に基づく高度かつ精密な作業を実現するための研究を行っている。

本稿では主に災害復旧のための建機の遠隔操作システムのヒューマンインタフェースに焦点を当て、前半では無人化施工の実例について紹介する。また、後半ではまだ実用段階には入っていないものの、ロボティクスやバーチャルリアリティ技術を応用した新しい無人化施工システムの研究事例について紹介する。

2. 無人化施工の実例

建設機械を用いた土木工事に無人化施工が導入された当初は、映像の支援がない遠隔操作であり、目視による施工がされていた[1]。その後、無線による遠隔操作のバックホーが導入されたが、操作装置は人が肩からかけて操作し、100[m]程度の範囲で目視で操作するものだった。また、劣悪な作業環境である圧気式のケーソンにおける無人化施工システムでは、立体視によるビデオカメラ画像を見ながら位置が固定された土砂搬出用バケットを操作するといった比較的単純な作業の遠隔操作であった。無人化施工が本格的に普及するきっかけとなったのが、雲仙普賢岳噴火災害の復旧工事である[2]。雲仙普賢岳での無人化施工では主要な

工種が除石工事であることから、ブルドーザ、バックホー、ダンプトラック、そしてブレイカが主要な建設機械として用いられた(図1(a))。そして操作者は、危険区域外に設置された操作室から無線により遠隔操作を行った(図1(b))。

雲仙普賢岳での無人化施工では、CCDカメラによって得られた映像をテレビモニタに映す手法や、ステレオカメラによって得られた映像を液晶シャッター眼鏡やHMD (Head mount display) を用いることで立体視する手法などが用いられた。通常のビデオ映像を提示した場合と比較し、立体視システムを用いてブロック積み作業を行った場合、作業効率が約20%程度向上したと報告されている[2]。ただし、立体視システムは視点移動や焦点移動等によって眼を酷使し、操作者は短時間で疲労や船酔い感を訴えることから、長期の作業を行うには人間工学的な面からの改善が必

(a) 遠隔操作による建設機械

(b) 操作室内の様子

図1 雲仙普賢岳における無人化施工[3]

原稿受付 2015年4月14日

キーワード: Construction Robot, Master-slave, Control, Tele-operation, Virtual Reality, Motion Base Control

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1

*Gifu-shi, Gifu

要であると報告されている。以来、基本的な遠隔操作システムは現在に至るまでほとんど変わっていない。ただし、ビデオ映像がハイビジョンに対応することで、以前よりも詳細な映像情報が得られ、3D 提示でなくとも現場の奥行き感がある程度得られるようになった。

3. 遠隔操作・臨場感提示建設ロボット

当研究室では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ている。具体的には、油圧パワーショベルを遠隔操作できるようにし、視覚提示に VR 技術を導入してオペレータに作業現場の十分な臨場感を与えると同時に、コンピュータの支援に基づく高度かつ精密な作業を実現するための研究を行っている。

図 2 に、本研究で扱う実験システムの概略を示す。建設ロボットは、ミニショベルにステレオ CCD カメラ、マイク等を取り付けて遠隔操作ができるように改造したもので、すべての油圧アクチュエータはスレーブ側コンピュータにより制御できるようになっている。操作者はステレオ視カメラから入力された画像、力覚フィードバック、音響フィードバックなどを有する臨場マニピレータより、建設ロボットを操作する。また、操作者の椅子は油圧式 3 軸揺動装置となっており、建設ロボットの動きに応じて、揺動するようになっている。これにより、操作者は、ロボットの動きをリアルに体感することができる。

3.1 オペレータへの揺動感覚提示

遠隔操作システムにおいて、建設ロボットの作業過程における動きや姿勢を高度な臨場感によって操作者に伝えることを目的として、建設機械の運動状況と姿勢をオペレータに提示している。本研究で対象とする 3 軸揺動装置の構成図を図 3 に示す。揺動装置上部のプラットフォームは、リンク部に連結された 3 本の油圧シリンダによって駆動される。

建設ロボットの姿勢を計測するための測定原理図を図 4 に示す。ただし、図では建設ロボットがロール方向に回転している様子を示している。図示のように、サージ、スウェイおよびヒープ方向の各加速度を検出するために、3 個の加速度センサを一行に配置している。例えば、スウェイ方向のセンサにより測定した加速度は、スウェイ運動の加速度と重力加速度の分加速度からなり、これを用いて、揺動装置に対するロール方向の回転角を与えるものとすれば、スウェイ運動の加速度を重力加速度の分加速度により擬似的に模擬することができる。同様な方法により、ピッチ角度の回転とサージ方向の運動についても、それぞれのセンサからの加速度情報により模擬することができる。上記で提案した本運動感覚提示法の有効性を確認するため、被験者による感性評価実験を行った結果、3 自由度揺動装置であっ

図 2 建設ロボットの遠隔制御システム

図 3 油圧 3 軸揺動装置

図 4 ロボットの姿勢の計測

ても、視覚情報を補助的に提示すれば、良好な 6 自由度の運動感覚が得られることを確認した [4]。

3.2 マスタ・スレーブ制御系

建設ロボットにより対象物を把持したときに、把持対象物の微妙な変形しやすさが判別できれば、対象物を壊さずに取り扱うことができる。当研究室ではこれまでに、対象物からの反力を、ジョイスティックへの力覚提示として操作者へフィードバックすることを行ってきた [5] [6]。

しかし、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操作者が正確に判別・認識して操作することは容易ではない。また、ジョイスティックからの微妙な力覚を手で感じ取りながら、対象物を壊さず、落

図5 操作者への画像提示

とさないように遠隔操作することは作業者にとって大きな負担となる。そこで、ジョイスティックからの力覚フィードバックに加えて対象物からの反力に基づく聴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[7]。

本システムでは、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、摩擦等力の外乱を補正した後、ジョイスティックへの力覚提示に加えて音声信号として操作者に力覚情報をフィードバックするものである。また、力覚・聴覚に加えて図5に示すように画像中にも力覚情報をゲージで提示するようにした。すなわち(a)CGによる作業現場の提示に加え、(b)実写映像および(c)フォークグラフへの反力およびジョイスティックへの力覚のゲージによる表示を行った。本システムを用いて評価実験を行い、操作性を改善できることを確認した。

3.3 遠隔操作のための視覚提示

遠隔操作システムでは操作者への視覚提示をどのように行うかが最も重要である。当研究室では、これまでステレオビデオ画像や、CG (Computer Graphics) を用いた自動視点移動による視覚提示を行ってきた。例えば、図6のようにビデオ映像を用いず作業対象物を含めてCGのみで構成した視覚提示を行った場合における作業効率についても検討を行った[8]。

また、固定されたカメラからの映像ではなく、操作者がカメラ視点を能動的に動かすことができれば、作業現場の状況をより正確に把握でき作業者の空間認識能力が向上することが期待できる。図7に示すようにオペレータの頭部に角度センサを設置し、オペレータが首を傾けることにより能動的に視点を動かせる視覚提示システムを構築した。図8にオペレータの頭上の角度センサの傾き角度に対応したCG内仮想カメラの移動軌跡を示す。

本システムを用いて、自動移動視点と角度センサを用いた曲線軌道の視点による作業を行ってもらい、評価を行った[9]。その結果、作業者が能動的に視点を移動する方法で

図6 CGによる視覚提示

図7 頭上にセットされた角度センサ

図8 仮想カメラの移動軌跡

は、作業現場の状況の把握がしやすくなり、操作の正確性や作業効率は図6の自動移動視点法よりも高くなることが確認された。またNASA-TLXという主観的評価手法により、操作者の作業疲労度を評価したところ、頭部による操作が必要となるため、身体への疲労感が増えるものの、全体として作業に対する精神的な負担が軽減されることが分かった。

さらに、作業精度を高めるため図9のように作業対象物の空間的認識精度を高められるAR (Augmented Reality) を用いた情報提示法、および作業精度の評価手法を開発し、実機実験を通してこれらの有効性を検証した[10]。本システムを学外からインターネット接続して遠隔操作をできるようにし、岐阜大学から約300[km]離れた場所からの遠隔操作実験に成功している。インターネット回線では通信の遅れが作業性を損なう可能性があるが、操作者に遅れの無い作業位置をARにより提示することで、その問題を低減させる研究にも取り組んでいる。

図9 ARによる操作ガイダンス表示

4. お わ り に

本稿では、当研究室における遠隔操作・臨場感提示建設ロボットの研究の一端を紹介した。今後は、建設ロボットシステム全体での総合的な使いやすさを実現するために、上記で述べたそれぞれの臨場感提示システムを組み合わせた場合の総合的な評価を行っていく予定である。なお、誌面の都合により一部の研究概要のみについて述べたが、詳細については文献を参考にされたい。

参 考 文 献

[1] 村松敏光：“情報化施工と今後の動向”，建設機械，2002-1，pp.8-19，2002.

- [2] 特集「雲仙における無人化施工について」，建設の機械化，vol.94，no.8，pp.3-29，1994.
- [3] 二次災害を防ぐ無人化施工が雲仙普賢岳，有珠山，三宅島などで活躍，FUJI SABO 通信 ふじあざみ（中部地方整備局 富士砂防事務所発行），vol.35，no.4，2002.
- [4] D. Zhao, Y. Xia, H. Yamada and T. Muto: “Presentation of Realistic motion to the Operator in Operating a Tele-operated Construction Robot,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14, no.2, pp.98-104, 2002.
- [5] 山田宏尚，加藤英寿，土井達也：“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）”，日本機械学会論文集 C 編，vol.73，no.735，pp.3055-3062，2007.
- [6] 黄玲涛，加藤英寿，川村拓也，山田宏尚：“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（仮想空間を用いた操作システムに対する力覚提示機能の有用性）”，日本フルードパワーシステム学会論文集，vol.42，no.3，pp.53-59，2011.
- [7] A.A. Yusof, T. Kawamura and H. Yamada: “Operational Evaluation of a Construction Robot Tele-operation with Force Feedback, — Evaluation of Tele-robotic Force Perception using Auditory Feedback?,” 日本フルードパワーシステム学会論文集，vol.43，no.1，pp.8-15，2012.
- [8] H. Yamada and T. Muto: “Construction Tele-Robotic System with Virtual Reality (CG Presentation of Virtual Robot and Task Object using Stereo Vision System),” International Journal of Control and Intelligent Systems, vol.35, no.3, pp.195-201, 2007.
- [9] A.A. Yusof, X. Tang, T. Kawamura and H. Yamada: “Construction Robot Tele-operation with a VR-aided Display: Workspace Viewpoint Manipulation Effect,” International Journal of Robotics & Automation, vol.26, no.4, pp.376-388, 2011.
- [10] H. Yamada, T. Kawamura and K. Ootsubo: “Development of a Teleoperation System for a Construction Robot,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.26, no.1, pp.110-111, 2014.

山田宏尚（Hironao Yamada）

1991 年名古屋大学大学院博士課程修了。工学博士。名古屋大学工学部講師等を経て 2007 年より岐阜大学工学部教授。人間支援システム，メカトロニクス，画像処理工学などの研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会会員。（日本ロボット学会正会員）