

# バーチャルリアリティ技術を用いた建設機械の遠隔操作システム

別府 弘邦 水野 太一  
法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

田中 豊  
法政大学工学部機械工学科

従来のカメラ画像やコンピュータグラフィックスを用いた遠隔操作に代わる新しい操作インターフェイスとして強調現実感を用いた遠隔操作手法を提案する。操作者の頭部の動きを検知し、それに基づきコンピュータグラフィックスとカメラ画像を同期させることで操作者の没入感を向上させ、あたかも遠隔地の現場にいるような感覚を提示する。本稿では建設機械の遠隔操作を応用例に取り上げ、その遠隔操作実験により通信距離に伴う通信時間遅れや遠隔操作による作業負担の有効性を実験的に検証する。

## 1. 緒論

災害現場、海底調査、宇宙空間の作業など、人間が立ち入るには危険な作業では遠隔操作を導入することが重要である[1][6]。しかしインターネットのようなネットワークを介した遠隔操作では、通信による時間遅れが発生し、作業効率に関する問題が発生している。そこで、コンピュータグラフィックス(CG)によって時間遅れを解決する方法[4][5][7]など様々な対策が提案されてきた。

しかし、CGだけの遠隔操作では作業空間の環境変化に対応することは不可能である。そこで本研究では強調現実感(Augmented Reality: AR)を用いて遠隔操作を支援する。ARはバーチャルリアリティ(VR)技術の応用であり、仮想世界と実世界を融合し、現実環境を強調しようとするものである。このAR技術は新しいマン・マシンインターフェイスとして注目されており、多くの分野への応用の可能性が期待されている[2]。

本研究では、作業現場からのカメラ画像に操作側で作成した時間遅れのないCGを重ね合わせることで、環境の変化が予測のできない作業空間に対して遠隔操作を行なうとき、対象物の動きの時間遅れを補償のできる操作インターフェイスを構築する。また操作者の頭部の動きを検知し、それに基づきCGとカメラを動かすことにより、操作者の視角を遠隔地にいるような感覚に調整して提示し、遠隔操作の作業効率を向上させる。この操作インターフェイスの応用例として、建設機械の遠隔操作を取り上げ、システムの有用性を検証する。

## 2. 強調現実感の適用

### 2.1 画像の重ね合わせの原理

本研究では強調現実感を得るために頭部搭載型視覚ディスプレイ(Head Mounted Display: HMD)を用いて簡易な方法で画像の重ね合わせを行う。HMDは操作者の左右の目に別々に像を提示することができる。Fig.1に重ね合わせの概念図を示す。操作者には遠隔地の操作対象のカメラ画像とCGで作られた仮想空間内の対象が左右の目にそれぞれ提示される。立体視の原理[3]により、操作者がこれら2つの画像を1つの画像として錯覚して認識することを、2つの画像を融合して1つの画像として提示する。

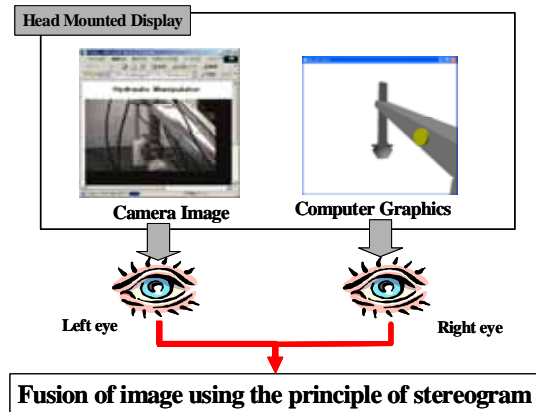


Fig.1 Mixed images for augmented reality

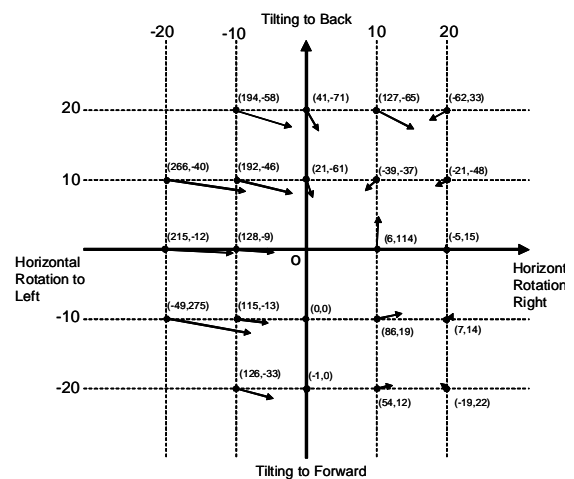


Fig.2 Error margin of CG overlapped in HMD

### 2.2 較正実験

頭部の動きに追従して、実空間とVR空間が動く場合、実空間内の目標物と、VR空間内の目標物の位置がどれだけ一致して見えるかを確かめるための較正実験を行った。



Fig.3 CCD camera image

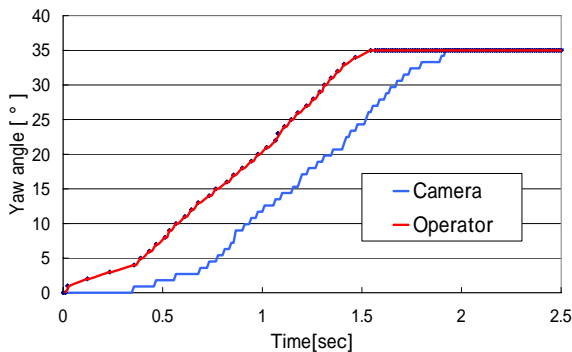


Fig.4 Change of tracking yaw angles

実空間の目標物はカメラから 500mm 離れた 1 辺が 100mm の立方体とした．VR 空間の目標物は正面を向いたとき HMD を通して 実空間の目標物の大きさと完全に一致するような立方体が CG により作られた．

Fig.2 に各姿勢における位置誤差をベクトル表示で示す．位置誤差は頭部姿勢が中心付近からはずれるほど大きくなる傾向があり，縦方向より横方向，右方向よりも左方向の誤差が大きい．この原因としてはレンズによるカメラ画像の歪が考えられる．Fig.3 に本研究で使用したカメラによって撮られた画像を示す．カメラ画像の左右外側域が湾曲してしまい，画像を重ね合わせる場合，このことを考慮して CG を作成する必要がある．また，本研究の重ね合わせ方法は，視野角度が人により異なるため，重なり具合に個人差が生じることがわかっている．そのため，画像を重ね合わせる場合，使用前に HMD 装着者毎に較正できる機能が必要である．

### 3. 臨場感の向上

遠隔操作の作業効率を上げるもう 1 つの手段として臨場感の向上がある．臨場感とは操作者の作業負担を軽減できる．本研究では操作者に頭部の角度を検知するヘッドトラッキングセンサを取り付け，その角度に応じてカメラを動かして，臨場感の向上を目指した．カメラは 2 つのステッピングモータによってヨーとピッチ方向に駆動

されるパン・チルト台上に設置されている．

Fig.4 に遠隔操作時における，検出された操作者頭部とそれに追従して動くパン・チルト台とのヨー方向角度の時間的変化の様子を示す．遠隔操作時でも操作者の頭部角度に対し，パン・チルト台がほぼ追従して動作していることがわかる．しかし操作者が頭部を動かし，カメラが動き出して画像を操作者が受け取るまで，約 0.3 秒の遅れがあることがわかった．この時間遅れはセンサ・駆動系の遅れだけでなく，カメラ画像を Web で配信するカメラサーバーの性能に大きく依存する．さらにステッピングモータ駆動時の振動がカメラ画像を揺らし，操作者に不快感を与え，一種の乗り物酔いをおこしてしまう心配もある．

## 4. 建設機械システムへの応用

### 4.1 システム構成

本研究で構築した遠隔操作インターフェイスを建設機械の遠隔操作システムに適用した．Fig.5 にシステム構成図を示す．遠隔地の操作対象である油圧ショベルはジョイスティックによって操作される．時間遅れを補償する CG は PC1 で作られ，同様に操作される．無線 LAN の通信プロトコルには，最も普及している TCP/IP を用いた．無線 LAN により PC2 と PC3 との間でジョイスティックの値，操作者の頭部の角度と遠隔地からのカメラ画像が送受信される．

時間遅れを補償する仮想空間用 CG の構築には VR 空間構築用ソフトウェア World Tool Kit を用いた．World Tool

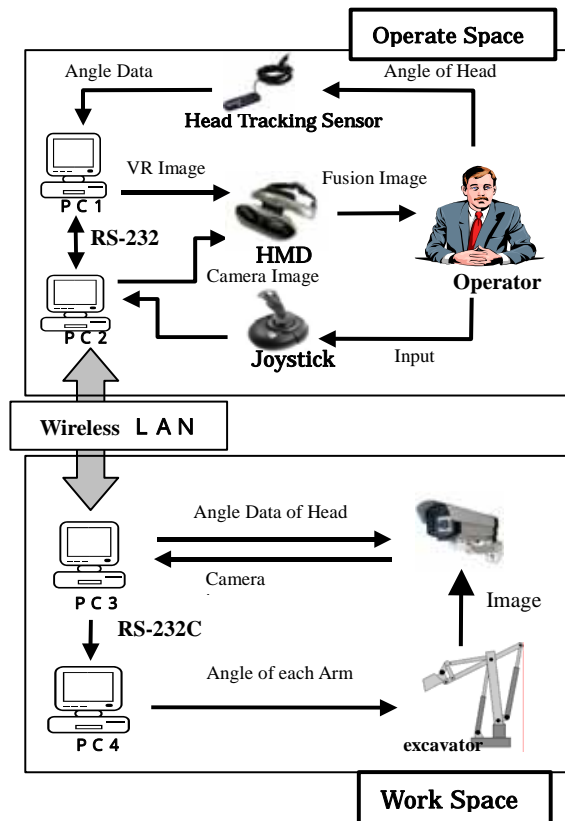


Fig.5 System configuration

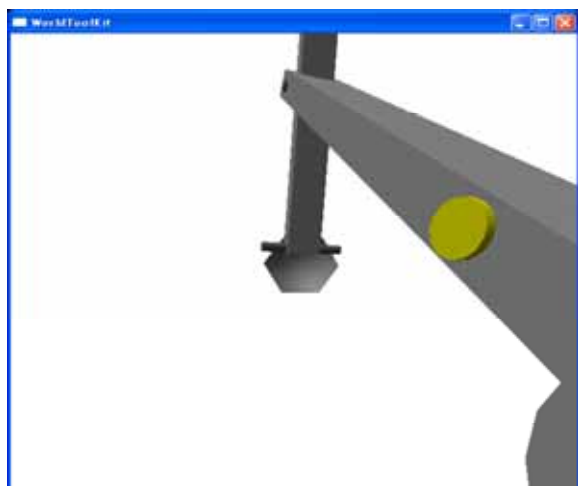


Fig.6 Computer graphics for excavator

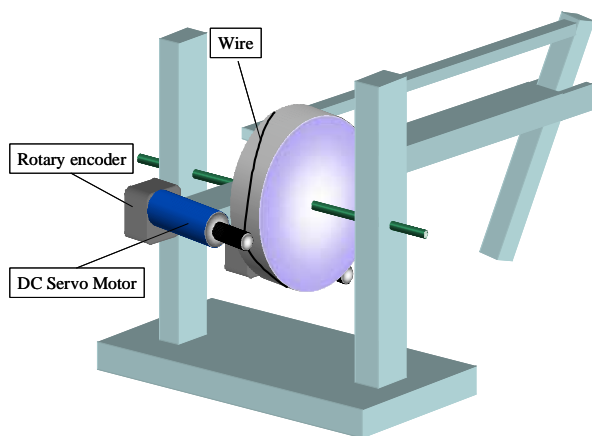


Fig.7 Master arm for operation

Kit は C, C++用の 3 次元グラフィックを描くための専用ライブラリであり。通常、処理が複雑となる物体同士の接触判定や視点の決定などが OpenGL や DirectX Graphics よりも高速かつ容易にできるという特徴がある。Fig.6 に製作した CG の一例を示す。本研究では、背景となる周辺環境はカメラ画像によって操作者に情報が提供されるので、操作対象である建設機械のみを CG で描き、その大きさは遠隔地にある操作対象の実機の大きさと一致させるように作られた。実際の操作者には、この CG が左眼に提示される。

本研究では操作方法として一般のジョイスティックに加えて、操作対象と相似型の操作作用マスターアームを用いた。通常、建設機械のショベルは 2 本のレバーを用いて操作が行われる。しかし、2 本のレバーで 4 自由度のショベルを操作するのは熟練の要る作業である。一方、マスターアーム式は直感的に操作でき、かつ各関節に設けたアクチュエータにより反力を提示させることで、より臨場感を向上させることができる。

Fig.6 に本研究で製作したマスターアームの構造概略を示す。ワイヤ駆動とリンク機構を用いることにより、

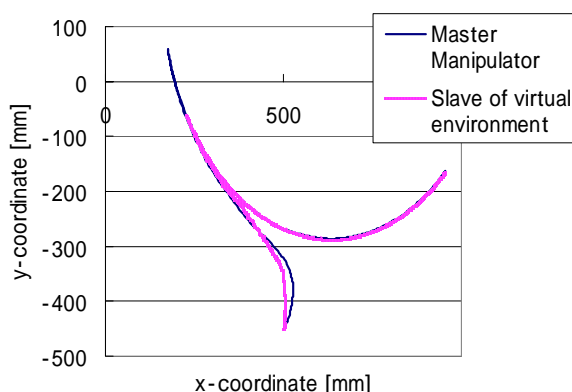


Fig.8 Experimental results for tracking operation

機構自体のバックラッシュを軽減し、ガタの無いスムーズな動作を実現した。また各関節に取り付けたロータリーエンコーダにより、関節の角度データを取得し、同じ軸に取り付けられた DC サーボモータにより、操作時の反力を提示する。

操作作用マスターアームを用いて操作入力を行い、仮想ショベルを操作した際の、操作入力と仮想ショベル CG 画像表示の追従性の確認実験を行った。マスターアームの各関節角度はロータリーエンコーダにより取得され、PC2 から RS232C を介して PC1 へ送られ、仮想空間の CG の動きに反映される。CG による仮想ショベルの角度データは、プログラム内の計算によって別途取得される。Fig.8 にショベル先端の動作軌跡の操作実験結果を示す。両者の軌跡には多少のずれはあるものの、操作に支障をきたすほどのものではないと考えられる。

#### 4.2 評価実験

建設機械システムにおける本インターフェイスの有効性を評価するため遠隔操作実験を行った。Fig.9 に遠隔操作実験に用いた作業空間を示す。実験は 2 つの接触作業対象となる円柱が一直線状に設置されており、油圧ショベルのバケットが初期位置から 2 つの円柱の上面を順番

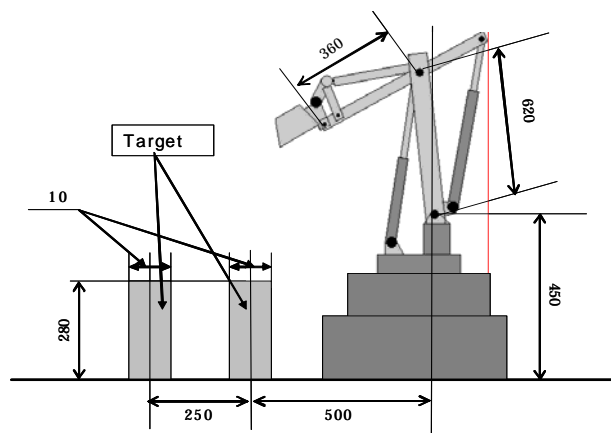


Fig.9 Work space for experiments



Fig.10 Mixed fusion images for CCD camera and CG

に触るまでの作業経過時間を測定した。実験は、カメラ画像だけを用いた場合、ARを用いた場合の2つの条件で行い、作業時間の比較を行った。Fig.10にカメラ画像とCG画像を融合した操作者用の視覚画像のイメージ図を示す。ARを用いた操作の場合、操作者はこのような画像をHMDで見ながら操作を行う。

Fig.11に実験結果を示す。ARを用いたほうがカメラ画像だけの場合より作業時間が大幅に短縮することがわかる。カメラ画像だけの場合では、提示される現場の画像に1秒程度の遅れがあり、画像の更新レートも一定ではない。こうした遅れのため、操作者は1回の操作量に対し、シヨベルがどれほど動くかを十分に把握できず、頻繁に動作を確認するむだな時間が発生してしまう。一方、ARを用いた場合、シヨベル動作はCGで描かれた仮想シヨベルの動く量と一致するため、操作者は仮想シヨベルを見ながら操作を行えばよく、いちいち動作を確認する必要がない。こうしたことが作業時間の短縮につながったと考えられる。また、操作に慣れていない者ほど両者の時間差は大きく、ARは操作経験の浅い初心者への操作方法の教示にも役立っていることがわかった。

## 5. 結論

本研究では強調現実感を遠隔操作に導入し、通信時間遅れを補償できるインターフェイスを構築した。そして建設機械システムを応用例としてその有効性を示した。また、操作者の頭部の動きにカメラを追随させることで、操作者に臨場感を提供することができた。今後は応用例を広げ、様々な作業に適用することで、カメラ画像とCGの融合度をさらに高め、カメラ画像とCGを区別することなく操作できるシステムの構築を行っていく。最後に本研究では法政大学計算科学研究センターのVR空間構築用ソフトウェアWorld Tool Kitを使用して仮想作業空間を構築した。ここに記して関係者に謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 財団法人先端建設技術センター編, 緊急時の無人化施工ガイドブック, 2001.
- [2] R. Azuma, "Recent Advances in Augmented Reality" IEEE Computer Graphics and Applications, 21-6 pp.34-47, 2001.
- [3] 下條信輔, 視覚の冒険, 産業図書, 1995.

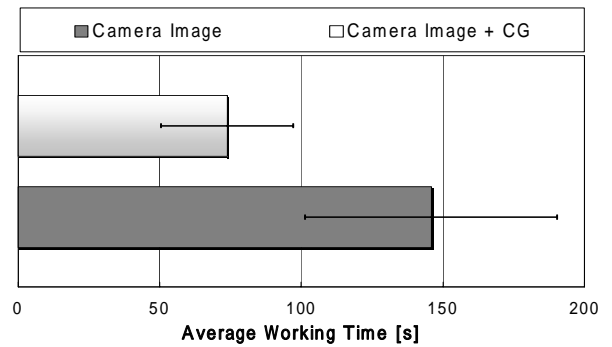


Fig.11 Experimental results for working times

- [4] 田中 豊, 仮想作業空間を用いた建設機械の遠隔操作, フルードパワーシステム (日本フルードパワーシステム学会誌), Vol.33, No.6, 2002, pp.383-387.
- [5] W.S. Kim, A.K. Bejczy, Demonstration of a High-Fidelity Predictive/Preview Display Technique for Telerobotic Servicing in Space, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.9, No.5, pp.698-702, 1993.
- [6] 山田宏尚, 武市教児, 武藤高義, 遠隔操作建設機械ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御, 日本機械学会論文集 (C編) 66巻 651号, pp.140-147, 2000.
- [7] 小菅, ネットワークを介した環境予測型遠隔操作システム, 日本ロボット学会誌, 17巻 4号, pp.473-476, 1999.

キーワード.

バーチャルリアリティ, 油圧ショベル, 強調現実感, 遠隔操作, ユーザーインターフェース

-----

Summary.

**Tele-Operated Hydraulic Excavator with Virtual Environment**

Hirokuni Beppu, Taichi Mizuno  
Graduate School of Engineering, Hosei University

Yutaka Tanaka  
Department of Mechanical Engineering, Hosei University

In this paper, it proposes a remote-controlled interface that uses Augmented Reality instead of conventional remote control that uses the camera image. This interface offers a high presence by moving the camera according to the angle of operator's head. As the example of applying the remote control of the construction machinery, it is experimentally verified that time delay generated by data transfer are compensated with the interface using Augmented Reality.

Keywords.

Virtual Reality, Hydraulic Excavator, Augmented Reality, Tele-Operation, User Interface