

ネットワークを介した建設機械の遠隔操作

大場 智章 工藤 直敏 田中 豊
法政大学工学部機械工学科

一柳 健
東京工科大学工学部機械制御工学科

近年の科学技術の進歩と人々の行動範囲の拡大に伴うニーズの多様化により、作業機械は様々な環境下で使用されるようになった。今後も作業機械の使用範囲は拡大し、人間が直接作業できない劣悪環境下での利用が期待されている。ここで注目されている技術が遠隔操作である。さらに、最近のネットワーク技術の著しい進歩に伴い、簡易な形で情報の伝達が可能になっている。これらの時代背景を踏まえ、ネットワークを介した建設機械の遠隔操作システムの構築を行う。本報では、遠隔操作システムに対するバーチャルリアリティ技術と JAVA を用いたデータ通信システムの適用について報告する。

1. はじめに

今日、広く用いられている作業機械は技術の進歩とユーザーニーズの多様化により、使用範囲が広がり、用途も多岐に渡っている。特に災害現場や宇宙空間、海底、原子力発電所をはじめとした各種プラント等、人間が直接作業を行うには危険な状況下や、人間が入り込めない特殊な状況下で複雑な作業を行うことのできる作業機械の開発が求められている。これらの観点から注目されている技術が遠隔操作システムである。作業現場に対し空間的に離れた位置から作業員が機械操作を行うもので、作業員の安全を確保することはもとより、劣悪環境下における精神的負担を軽減し、作業効率の向上が期待できる。さらに、近年の著しいネットワーク技術の進歩と普及により、高精度で応用性の高い遠隔操作システムの構築が可能となっている。

一方、遠隔操作システムでは作業現場と操縦者が時間的・空間的に隔てられることから、作業機械の自律化とロバスト安定性の確保、そして作業員への臨場感のある操作感覚の確保が不可欠な要素となる。

近年、建設業界においても業界内競争力アップ、対環境保全対策のため、建設機械のロボット化が進められている。遠隔操作に関してバーチャルリアリティ技術を応用し、パイラテラル制御を用いたシステム等が研究されている。また、潜函工の無人化を図る無人化ケーソン工法等の実用化も始まっている[1]。しかし、これらの技術は比較的近距离かつリアルタイムでの情報伝達が可能な環境下での技術であり、用途に限られ、開発途上の技術といえる。

油圧マニピュレータにおけるロバスト安定性に関しては、外乱推定オブザーバを用いたシステムにより定常偏差がなく、負荷変動や姿勢変化における各関節相互作用による振動を抑え、高精度な位置制御を実現できることが確認されている[2][3]。

本研究では遠隔地の操作にも対応する、インターネットなどの汎用ネットワークを介した建設機械の遠隔操作システム構築を目的として、特に遠隔操作における操作感覚提示による操作性の向上に着目して研究を行った。本報告では伝送時間遅れの問題や臨場感の問題を補償・軽減するための仮想空間と力感覚提示型ジョイスティックを使用し、ネットワークを介した遠隔操作システムの開発結果と、その有効性の検証結果について報告する。

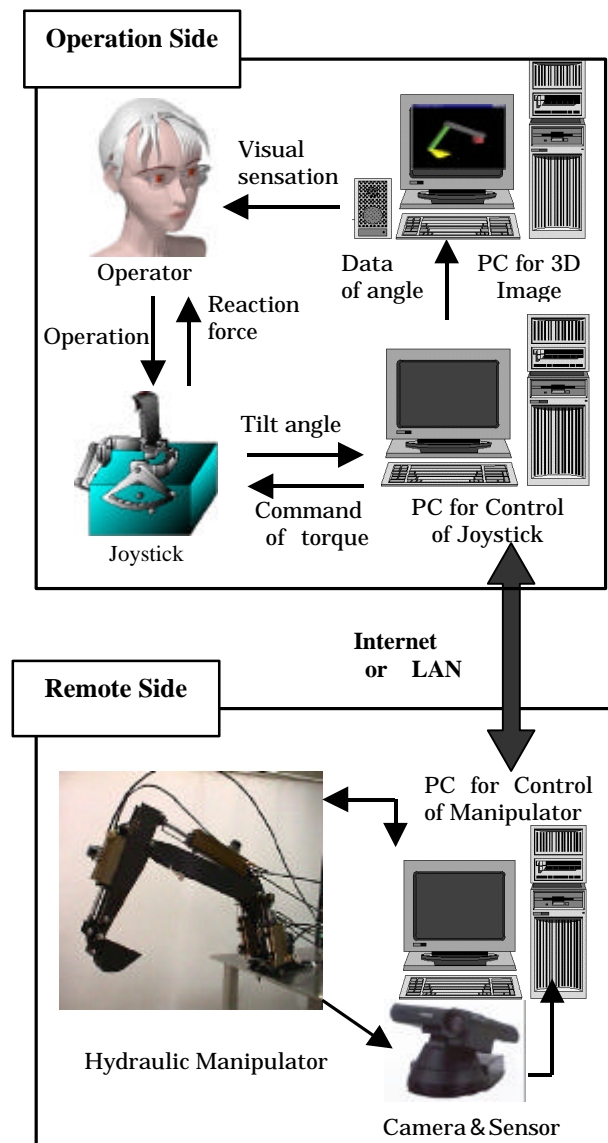


Fig.1 System Configuration

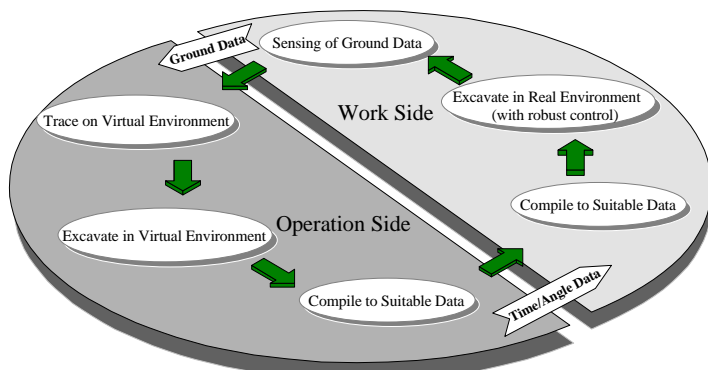


Fig.2 Data Communication Process

2. 遠隔操作システム

本システムは Fig.1 に示すような建設機械作業側と操縦側により構成される。本研究を進めるにあたり、操縦側を法政大学工学部機械工学科中研究室、建設機械作業側を東京工科大学工学部機械制御工学科一柳研究室に配置し、システム構築を行った。建設機械作業側は建設機械（油圧式マニピュレータ）、データ通信およびマニピュレータ制御用コンピュータ、現場確認用 CCD カメラおよび各種センサからなる。一方、建設機械作業側から空間的に離れた操縦側は力感覚提示型ジョイスティック（米国 Immersion 社製 Impulse Engine 2000）とジョイスティック制御及び仮想作業空間構築用コンピュータから構成される。操作者はコンピュータ上の仮想空間より視覚情報、力感覚提示型ジョイスティックから力覚情報を得ることで作業現場に対する臨場感を保ちながら操作を行う。

操縦者は仮想作業空間をもとに作業を遂行し、一定作業終了後作業データを建設機械作業側へ LAN やインターネットシステムを介し伝送する。Fig.2 に情報の伝達過程の模式図を示す。建設機械作業側の現場情報は作業終了後各種センサにより測定し、操縦側へ伝送、仮想空間へ反映させる。このシステムにより、操縦者は操縦側を独立したもとして仮想作業空間内で実時間における相互作用を保ちながら作業可能であり、操縦者は情報の伝送時間遅れを感じることなく操縦し得る。さらには、建設機械への作業動作を操縦空間で高効率のものに加工・補正することも可能となる。

3. 操縦側システム

3.1 力感覚提示型ジョイスティック

Fig.3 に本研究で用いた力感覚提示型ジョイスティックの構造を示す。このジョイスティックは反力提示のために X 軸 Y 軸それぞれに DC モータが取り付けられており、DC モータによる反力はワイヤーを介し操作グリップ部に伝達される。ワイヤーを用いた機構により、バックラッシュのないスムーズな反力を操縦者に提示可能となっている。ジョイスティックの操作情報は DC モータと同軸上に取り付けられたロータリーエンコーダにより検出する。

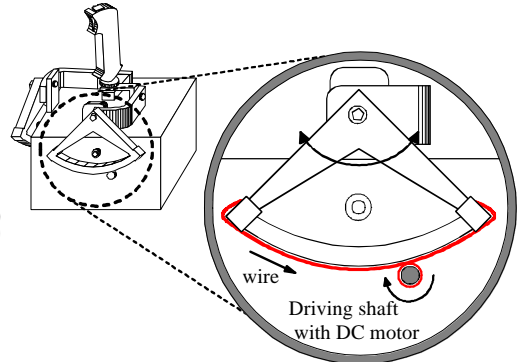
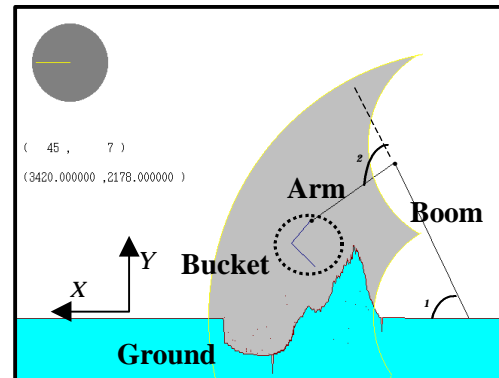
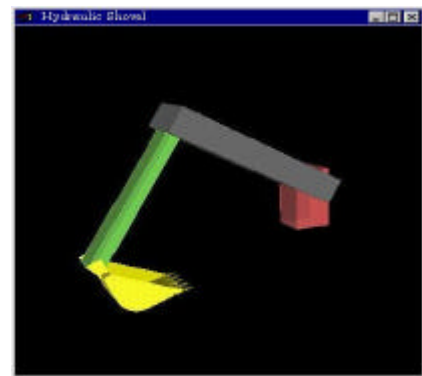


Fig.3 Force-Reflecting Type Joystick



(a) 2D Model Work Space



(b) 3D Model Work Space

Fig.4 Virtual Environment

3.2 仮想作業空間

作業（建設）機械の汎用作業である掘削を作業対象として基本モデルの構築を進めた。Fig.4 に構築した仮想作業空間を示す。コンピュータ上に仮想作業空間として操作対象建設機械と同一比のブーム・アーム・バケットからなるモデルおよび作業物体として地面を設定した。通常の油圧ショベルでは、ブーム・アームそれぞれ別のレバーを用い速度入力として操縦を行っている。しかし本システムでは、仮想作業空間を用いることにより側面からの視点を確保できるため、マニピュレータ先端を一本のレバーで操縦する方式とした。さらに、コンピュータ上での視覚的に狭い空間での作業を行うことから、ジョイスティックは位置入力とすることで操作性向上を図

った。この際、アーム先端動作に対するブーム、アームの関節角の算出にマニピュレータヤコビアンを使用した。各ジョイントの回転角 θ_1, θ_2 の微小変化分をそれぞれ $d\theta_1, d\theta_2$ 、アーム先端部の位置 x, y の微小変化をそれぞれ dx, dy とすると以下の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

以上のように、ブームとアームはジョイスティックからの入力により動作し、バケットはキーボードからの入力とすることで掘削動作を行う。

3.3 操作感覚提示

提示反力に関しては、ジョイスティックによる目標値と仮想作業空間の設定値をもとに計算を行う。通常の掘削作業において、操縦者はジョイスティックへの振動、車体全体の挙動、音の変化により現場状況や作業状態を把握する。この際、土砂の状態により掘削抵抗や切削抵抗は異なり[4][5]、伝わる感覚も変化する。本研究では、操縦の効率向上を優先に考え、実際の掘削作業で受ける感覚とは多少異なる作業イメージをもとに反力設定を進めた。すなわち、バケット部分に数点の接触判定点を設け対象物体（地面の表面）に対する接触判定を行い、各点の位置および移動速度をもとに反力を設定した。掘削時にはバケット先端の移動速度に比例した抵抗力を提示、壁に接触した場合やバケット背面での接触の際はめり込み量に比例した反力を設定した。また、掘削した砂の量がバケット容量に達すると一定の周期で振動を提示させることで、壁との差別化を図った。Fig.5 に感覚提示結果の一例を示す。

4. データ通信

データ通信システムは OS に依存しない Java を用いて作成した。一連の作業終了後、仮想空間でのブーム、アーム、バケットの動作角度を作業データとして保存する。IP またはホスト名により、Server 側（操縦側）と Client 側（建設機械作業側）を接続し、接続完了後作業データを送受信する。この作業データを用いて仮想作業空間と同様な動作を実作業側で行う。その後建設機械作業空間における掘削面の位置座標（X, Y）情報を各種センサーより取り込み、送信、仮想作業空間を更新する。一度に送信できるデータ数は有効数字 2 桁の 3 つの角度情報を 1 データとするとコンピュータのメモリの都合上、約 6 万データとなる。Fig.6 はデータ通信用に自作したユーザーインタフェースの画面である。現システム内で通信データの欠落等は起っていない。データ送信後の実作業空間での作業の確認は、カメラサーバにより Web 上でも確認する。

5. 遠隔操作システム基礎実験

本システムの構築にあたり現状では大学間でのセキュリティ問題が存在するため、データ通信が行えていない。そこで、本研究では法政大学側の既存の油圧式アームロボットを操作対象とし基礎実験をすすめた。

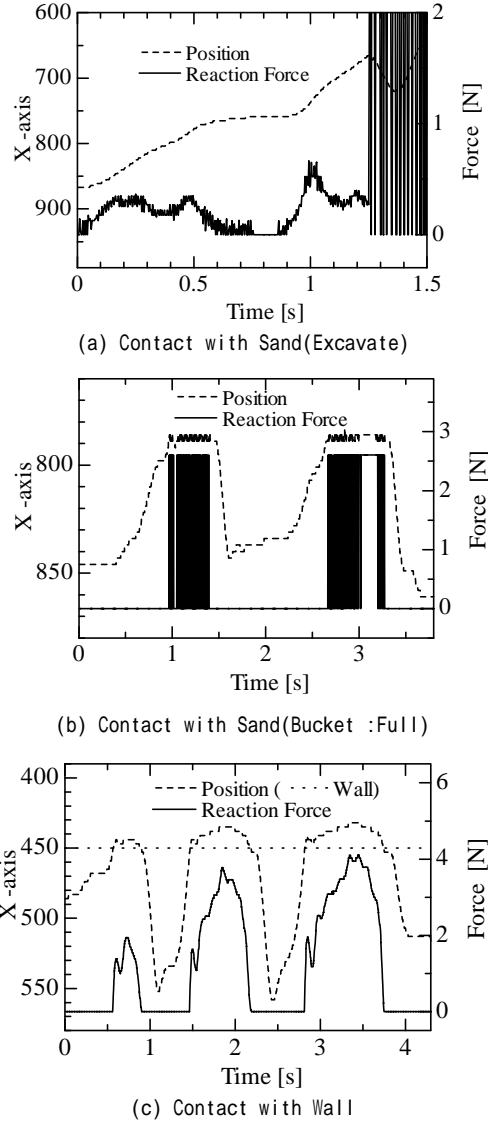


Fig.5 Force Reflection from Virtual Work Space

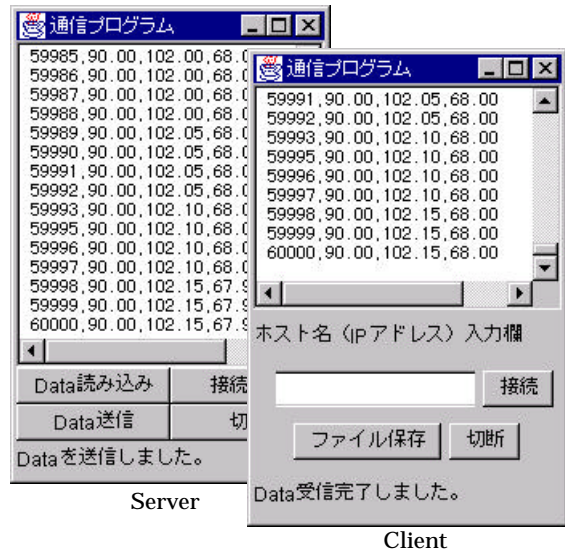


Fig.6 GUI for Network Data Communication

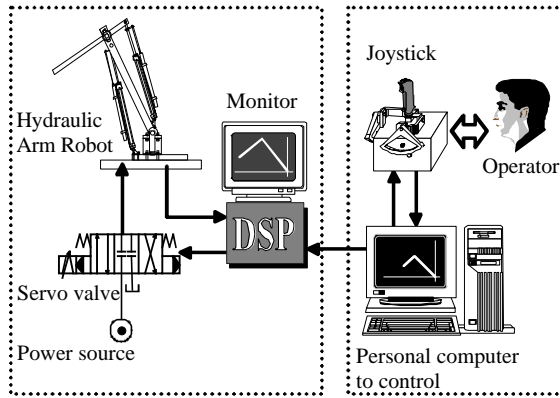


Fig.7 Test System

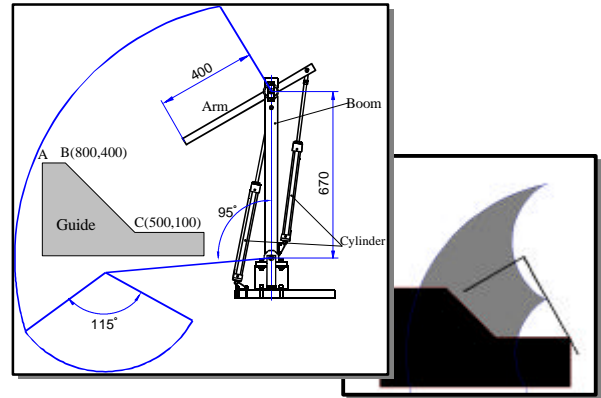


Fig.8 Test Environment

5.1 実験システム

大学間での遠隔操作システムと同様な形で実験システムを構築した。Fig.7 に実験システムの構成を示す。操縦対象は建設機械を模し製作した油圧式アームロボットである。アームロボットはブーム、アームおよび油圧シリンダから成る自由度2の平面リンク機構を成している。操縦側からの角度指令は DA/AD ボードを介しアームロボット制御用コンピュータへと伝送される。この角度指令を入力信号とし、アームロボット各関節部回転型ポテンシオメータからの角度情報との偏差を用い DSP 上で制御を行う。

5.2 遠隔操作システム実装実験

仮想作業空間上に Fig.8 に示す対象物を構築した。アーム先端部が対象物体表面を沿うように操縦し、先端軌跡による検討を行う。この際、仮想作業空間で作業終了後アームロボットへ角度指令を伝送し、仮想作業空間内の操縦に対し、実空間では 1/3 の速度で動作するよう設定を行った。油圧システムは、油圧源の供給圧 2.5[MPa] のもとで、角度のフィードバックによる比例制御系を構築して実験を行った。

ジョイスティックにより反力を提示した際の仮想空間内の軌跡、およびアームロボットの動作軌跡を Fig.9(a) に示す。さらに反力の有無による操作軌跡を Fig.9(b) に示す。Fig.9(a) より、油圧式アームロボットの先端軌跡は操作指令に追従しており、試作した情報伝達システムの有効性が確認できる。また Fig.9(b) において、反力提示を行わない場合、安定した軌跡を描くことが困難であり、反力提示の有効性が確認できる。

6. おわりに

建設機械における仮想空間を用いた遠隔操作システムの構築を行った。臨場感ある操作感覚提示に力感覚提示型ジョイスティックを用いることの有効性を確認した。また、仮想空間を用いることで操縦者は作業に対し実時間相互作用を保つことができ、時間遅れによるストレスを感じることはないシステムを構築した。さらに、発展著しいネットワーク技術に対応した通信プログラムの作成を行った。今後、建設機械の自律化を進めることで高効率なシステムの開発を進めるとともに、実機を用いバケットによる掘削作業実験を行うことで、本システム全

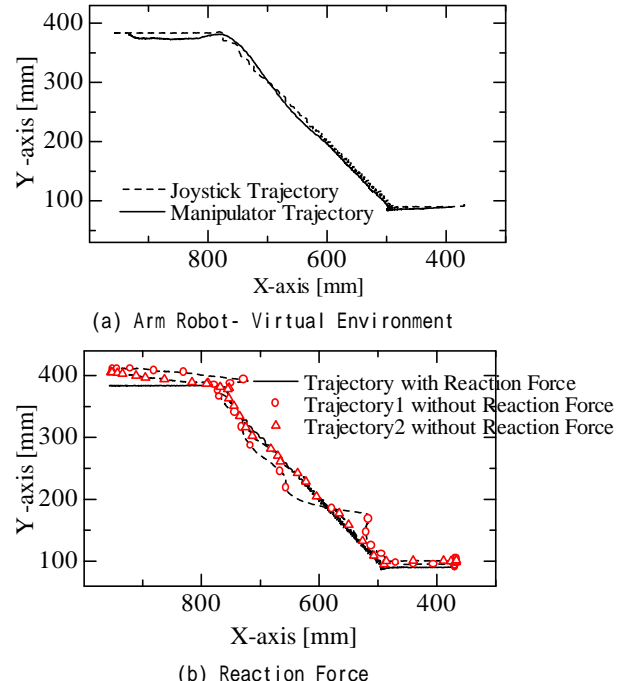


Fig.9 Experimental Results for Tele-Operation

体の評価検討を行う必要がある。さらに、ネットワークを介した遠隔操作として、東京工科大学の作業用機械を法政大学より操作することを旨とした実機システムを完成させる予定である。

参考文献

- [1]山崎吉晴, 大矢真二, "万代橋下流橋下部工事", 土木技術, 土木技術社, pp.49-57, 1999
- [2]Yutaka Tanaka, Yan Yuqing, Go Adachi, Tomoaki Oba, "TELEOPERATED CONTROL OF TWO-DEGREE-OF-FREEDOM HYDRAULIC MANIPULATOR", Proceedings of the 3rd International Symposium on Fluid Power Transmission and Control, pp.617-622, 1999
- [3]小林秀其, 横田真一, 蛭川立雄, 江川栄治, "油圧式ショベルのブーム・アーム・バケット系の高精度軌跡制御", 平成9年秋季油空圧講演会講演論文集, pp.51-53, 1997
- [4]畠昭治郎, "建設機械学", 鹿島出版会, 1987
- [5]能城正治, "土質力学の基礎", 技報堂出版, 1983

キーワード.

仮想空間、作業機械、遠隔操作、ヴァーチャルリアリティ、ネットワーク、反力提示型ジョイスティック

Summary.

Teleoperated Control of Construction Machinery with Network

Tomoaki Oba Naotoshi Kudo Yutaka Tanaka
Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Ken Ichiryu
Department of Mechatronics, Tokyo University of Technology

Hydraulic manipulated construction machinery such as an excavator is widely used for heavy duty industrial machines. Recently the construction machinery is used for tele-operated remote control system under the hazardous environment such as space or disaster area. In conventional tele-operated systems, it is difficult for isolated operators to manipulate remotely without presence transmitted from remote locations. In this paper, the remote manipulation system for the construction machinery compensated by virtual environment has been developed. A force reflecting type joystick is used for operating the model of the hydraulic manipulator. The reaction force is calculated by a mathematical model in the virtual environment. A network communication software between the operator's side with the virtual environment and the remote side with the hydraulic manipulator is applied to the programming language with the JAVA. It is experimentally verified that the proposed remote manipulation system with the reaction force is much effective for the operator.

Keywords.

Virtual Work Space、Construction Machinery、Teleoperated Control、Virtual Reality、Network、Force-Reflecting Joystick