臨場感ある遠隔操作を実現するオペレータへの提示技術の研究

RESEARCH INTO TECHNOLOGY FOR PRESENTING REMOTE WORK
INFORMATION THAT GIVES THE OPERATOR
THE FEELING OF BEING AT THE SITE

鷹 巢 征 行*

Masayuki TAKASU

If the sense of sight and dynamic feeling that gives the operator the feeling of being at the site can be given to the operator, repairs of the wall surface can be realized not from on the staging but on the ground. By the use of this technology, extreme work including deep excavation and sheathing work can be carried out safely and effectively. This paper summarizes the experiments of and research into the technology for presenting information that gives the feeling of being at the site to carry out such construction work remotely, and states the necessity and possibility of this field of research.

Keyword : Robot, Operator, Manipulator, bilateral, Master—Slave, 3 D Camera

ロボット、オペレータ、マニピュレータ、バイテラル、マスター・スレーブ、3Dカメラ

1. はじめに

従来、建設機械の遠隔操縦技術は操縦者側からの一方向の指示で行ってきた。近年、様々な建設機械の遠隔操縦化が進むようになると、作業現場と離れた所にいるオペレータがあたかも現場にいるかのような臨場感を得るために作業機側からの情報を得て操縦する必要が生じた。例えば、建築物の壁面に吸着しながら移動する壁面走行装置に作業アームを取付け、従来の仮設足場上からの検査・補修作業を代替したり、人間の作業環境としては過酷な地下工事を無人化し安全で効率の良い建設作業が求められている。

そこで、臨場感ある視覚の提示技術と建設機械にかかる負荷を手に感じる力覚を提示する技術について基礎的な実験を行い、この分野の実用化に先鞭をつけることができたので報告する。

2. 臨場感ある視覚の提示技術

2-1 提示技術の要因と方式

臨場感ある視覚とは、表1に示す奥行き、立体、3次元などを提示する技術のことであり、空間から様々な手がかりを利用することといえる。奥行きディスプレイでは、単眼情報による心理効果を利用して、透視、重なり合い、陰影などを手がかりとして虚像や大画面で表示面の存在感を不確定にして奥行き感を出している。2次

元画像2枚を用いて両眼視差効果で立体画像を得る立体ディスプレイでは、メガネの装着とメガネなしで表示面の工夫で対応するものがある。

さらに、運動視覚による多方向からの観察の効果も含めた3次元ディスプレイが研究されている。^{1)、2)、3)、4)}

2-2 各ディスプレイの特質

メガネ式の波長分離方式は、観察される立体像は単色でありカラー表示できないし、左右の眼に別々の色(波長)の画像を提示するため、視野闘争が起こり疲労しやすいという欠点を持つ。

偏光分離方式(図1)は、メガネとディスプレイにそれぞれ対応

表1 臨場感ある視覚の分類

* 東急建設機技術研究所メカトロ研究部 部長・技術士

Tokyu Construction Co., Ltd. Consulting Engineer Authorized by Japanese Government

する偏光板を使用するものである。この偏光板は、光の波形の一方方向だけを通すもので、左右の眼に対応する画像の表示面にはメガネ像を合成するようにしている。この方式は、観察者の姿勢変動が両眼情報の分離を不完全にするが、カラー表示が出来、簡便で安価である。液晶シャッター方式（図2）は、メガネがディスプレイに対応してシャッターの制御が行われるものであり、左右の画像の表示に同期して行われる。片眼あたりの画像更新速度がもともとのCRTの半分になってしまい、ちらつき（フリッカ）が多く眼の疲れが起きやすい。これを改良した円偏光液晶シャッター方式（図3）は、円偏光メガネがモニタとはオフラインになっており、同時に多数の人が観察できるが、CRTの画面を2分割しているため解像度が半分になってしまう。⁵⁾

表示面式は、両眼への映像を分離表示するのに、観察側でなく表示面側に工夫をし、分離観察する方式で、パララックスバリア（図4）、レンチキュラー板（図5）、などを利用して、両眼用の画像を作り出す。メガネを必要としない点にメリットがあるが、観察位置に制限があるので使用しにくい。

3次元ディスプレイの波面再生法（ホログラフィ）は、従来のホログラムの視域が狭い、質感、色など画質の難点を解決したが、一度記録された映像を再生する方式のため実時間で動画を提示することはできない。HMD（Head Mounted Display）は、ディスプレイ装置を頭部に搭載するもので、観察者の向いている位置を磁気やジャイロセンサによって検出し、向いている方向の映像をディスプレイ装置に提示する。HMDを搭載することで外界の情報が遮断さ

図1 偏光分離方式

図2 液晶シャッター方式

図3 円偏光液晶シャッター方式

図4 パララックスバリア

図5 レンティキュラー板

れ没入感が高く、カメラの方向制御が容易などのメリットを持つが、視野が狭い、解像度が低い、頭部に重量物を搭載する必要があるなどの欠点がある。⁷⁾

2-3 建設機械のディスプレイ

表1の分類にある各ディスプレイには一長一短があり、操縦者が長時間使用しても疲労が少ないこと、対象物の位置決めが容易であること、任意の方向を観測できること、作業レベルに応じたコストであることなど、選定にあたってはこれら建設機械の遠隔操縦の条件を満足するものでなくてはならない。大画面から奥行き感を出すものでは操縦室のスペースがとれない、解像度の悪いHMDや表示面式は、位置決め作業に難があり、波面再生法では実時間作業ができない。したがって、メガネを使用する液晶シャッター方式か、偏光分離方式に絞られるが、長時間作業するオペレーターの疲労の軽減を最優先に考えた場合、フリッカのない偏光分離方式が最も有効であると考えた。

2-4 偏差実験-1（位置決め誤差）

機械を通して人間が映像を認識する場合、より高い臨場感を得るには、なるべく人間が肉眼で直視している状態に近い物を再現することが望ましい。建設作業の中でも、マニピュレータを用いた補修作業やプレハブ部材の据付を想定して視覚システムを考える場合、カメラで受信した作業情報をリアルタイムで、しかも高精度の映像をオペレータに提示する必要がある、対象物体の相対位置をかなり精度良く知覚しなければならない。そこで、偏光分離式のメガネによる立体映像提示の視覚システムの有効性を確認する目的で、遠隔に配した小型産業用ロボット（三菱ムーブマスター）を被験者が操縦し、肉眼、カメラ1台、立体カメラのそれぞれの位置決め誤差を計測し比較した。

本研究における実験条件は次のとおり。

照明：E V 値 13、絞り：F18、眼高：33[mm]、測定距離：200、150、120、100、80、50[cm]、測定点高：33[mm]。

視覚検証実験装置の配置を図6に示す。ここでは、肉眼による計測、平面ディスプレイ（通常のモニター）および立体ディスプレイ（偏光分離方式）に提示された像を観察しながら行っている。目標ポイントを記した平面上50[mm]の高さに測定棒を設置し、これを平面に対して等距離を保ちつつモニターの遠近方向に1軸の運動をする。被験者は、この運動する測定棒が測定するポイントの真上にあると知覚したときにその地点を測定、ポイントからの誤差を測定した。

図7に観察距離と偏差の関係を示す。平面ディスプレイに比べ、立体ディスプレイで観察すれば、ほぼ肉眼に近い位置決め精度を確保することができることが判った。^{8)、9)}

図6 実験装置配置図

図7 観察距離と偏差

2-5 偏差実験-2 (位置決め時間)

次に、肉眼、カメラ1台および立体カメラの位置決め時間の差異を求めた。ここでは、実際の建設作業に使われている破砕機チゼルを装着した建設機械(0.7[m³]バックホウ)のブレーカ作業を肉眼、平面ディスプレイおよび立体ディスプレイによる位置決め時間計測試験を実施した。この試験では、バックホウの作業機先端のチゼルを動かし、前後差のある3個の標的上で一時停止、その所要時間を統計的に処理し、位置決め性能を求めた。標的は、φ150[mm]、地上高0、25、50[cm]の杭をランダムに配置し、2名のオペレータが習熟効果が出ないよう1パターン当たり5回で交代した。チゼルの移動は、始点からスタートし、左端→右端、終点(始点と同位点)の順で行い、何れのパターンも移動距離を一定になるよう設定した。チゼルの標的接触状況を写真1に示す。

写真1 標的接触状況

試験結果を図8に示す。肉眼では、中央値9秒、最頻値7秒、標準偏差2.9秒、平面ディスプレイでは、中央値21秒、最頻値30秒、標準偏差5.6秒であった。ただし位置出し不能が18パーセント発生したのでこれをデータから除外した。立体ディスプレイでは、中央値14秒、最頻値10秒、標準偏差4.1秒となった。肉眼以外はデータのバラツキが大きく、平面ディスプレイは位置だし不能の他、サイクル当たりの所要時間が2倍以上かかるなど作業効率の低下が著しい。

2-6 ディスプレイの生理的影響

被験者にヒアリングした結果から平面ディスプレイ、立体ディスプレイの生理的影響を比較した。

①平面ディスプレイの場合、目がチカチカする、目の焦点が合わせにくい、目が痛いなど立体ディスプレイに較べ症状が出ている。これは、奥行き感覚を得ようとして過度に水晶体の調節を行うためである。②立体ディスプレイの方が平面ディスプレイに較べ視覚情報が多いため、判断材料が多く仕事はやりやすい反面集中力が高まった分疲れる。③立体ディスプレイは画面が浮いている感覚があり、特に画面移動があると違和感があったり、時々ぼやけて見えることがある。これは、平行に固定された2台のカメラの輻輳角とオペレータの視点とに相違がでるためである。

図8 サイクルタイムの度数分布

2-7 この項のまとめ

遠隔地の建設機械の運転に視覚臨場感を得るためメガネによる偏光分離式（立体ディスプレイ）に狙いを定めた実用的な実験研究を行った。立体ディスプレイは平面ディスプレイにくらべ、位置だしおよび作業能率で優れ眼の疲労も軽微という結果であった。しかしながら、肉眼との比較からは作業能率の低下および生理的違和感の発生が認められた。

人はものを見るときに、ものの位置で視線が交差するように両眼の向きを内側に寄せ（輻輳運動）、ものの距離に応じてピントを合わせる（水晶体の調節）。自然にものを見ているときは、両者のバランスがとれているが、モニターを介することでバランスが崩れる。したがって、観察者個々に合った輻輳角と焦点調節の整合をとった立体画像を提示することで肉眼に近い性能を得ることができると考え、追従型カメラ雲台を提案する。雲台は人間の頭部旋回速度と同等の $360[\text{deg/s}]$ を実現し、雲台上部に搭載した立体視用カメラ2台をこれまでのように平行に固定するのではなく距離計（赤外線）と連動し、カメラからものまでの距離計測情報から輻輳角が自動調整できるように動かす。一方、観察者の頭部には磁気センサをセットして頭部の動きを感じし雲台のパンおよびチルトに連動させる。個人差の調整のため両眼注視点と輻輳ポイントを調整できるようにすれば、3次元ディスプレイの違和感の解消が図れる。

3. バイラテラルな操縦技術

建設機械の操縦は、前項の実験でも使用してきたようにジョイスティック方式が一般的である。しかしながら、遠隔から臨場感をもって操縦するには、操作が複雑なジョイスティック方式よりもマスタ・スレーブ方式が適している。マスタ・スレーブ方式では、距離を隔たマスタ機構とスレーブ機構においてオペレータはマスタ機構を操縦し、作業対象物はスレーブ機構により駆動される。スレーブ機構の運動は、マスタ機構の運動に対応して制御され、その結果オペレータの操縦により作業対象物の位置、姿勢、力が制御される。

特に、遠隔地で感覚情報が伝わりにくい状況ではスレーブ機構にかかる力を直接マスタ機構に帰すことが有効と考え、ここに変位制御・力帰還型バイラテラル制御を用いた力覚臨場感を持つマスタ・スレーブ機構の可能性を追求することとした。

マスタ・スレーブ機構に関する既存の研究の多くは一自由度の単純なシステムであり、多関節型マニピュレータなど多自由度に関するものは少ない。さらに、建設作業の大負荷を取り扱うため使用する油圧駆動のものはさらに複雑なシステムとなるなど、開発にあたって解決されるべき課題は多い。

図9 変位制御・力帰還型バイラテラル制御方式の原理図

3-1 変位制御・力帰還型バイラテラル制御系の構成

力および位置制御を行う制御系として、変位制御・力帰還型バイラテラル制御方式を構成した。本制御方式の原理図を図9に示す。マスタ機構・スレーブ機構にはそれぞれ変位検出器・力検出器が装備される。スレーブ機構にはマスタ機構の変位に追従するように変位制御系が組みられ、マスタ機構にはスレーブ機構の力に追従するように力制御系が組みられている。これによって操作者はマスタ機構を動かしてスレーブ機構の変位を操作し、マスタ機構はスレーブ機構に生じる力を操作者に伝える。ただし、 O_m ：マスタ機構の操作量、 O_s ：スレーブ機構の操作量、 θ_m ：マスタ機構の角度変位、 θ_s ：スレーブ機構の角度変位、 τ_m ：マスタ機構のトルク、 τ_s ：スレーブ機構のトルク。

3-2 マスタ・スレーブの機構の構成

(1) スレーブ機構の構成

スレーブ機構は汎用型超ミニショベル ($0.02[\text{m}^3]$) を改造し、サーボ弁、変位センサ、圧力センサ、油圧サーボバルブを装備することによってブーム、アーム、バケットの3つのリンクからなる多関節機スレーブマニピュレータとした。

変位の検出には、ピストンロッドに刻まれた磁気スケールを変位センサとして用いた。サーボバルブはミニショベル本体に設置され、

図10 マスタ・スレーブ機構の変位制御系の構成

各シリンダとはフレキシブルチューブで接続されている。駆動油は油圧源よりサーボバルブ・フレキシブルチューブを経てシリンダに供給される。スレーブ機構にかかる荷重は、油圧シリンダの両室の油の圧力を検出し、ピストンロッドに働く力として計算する。この方法によって検出される力は、各リンクの自重、関節軸の摩擦、シリンダとピストン間の摩擦、油の管路摩擦などを含むが、市販の圧力センサの設置のみによって実現し、特別な改造や新しい機構の開発の必要はない。

(2) スレーブ機構の変位制御系

スレーブ機構の変位制御系を図10で説明する。ただし、添え字 i は 1 : ブーム、2 : アーム、3 : パケットを表す。マスタ機構の角度変位信号 θ_{mi} はコンピュータによってピストン変位信号 P_{ri} に変換され、位置制御コントローラに取り込まれる。コントローラから出力された信号 O_{si} がサーボアンプを介してサーボバルブに電流 I_{si} として入力される。サーボバルブのスプールがその信号に応じて開度を変え、スレーブ機構のシリンダが作動する。シリンダからそのピストン変位 P_{si} が検出され、位置制御コントローラに取り込まれる。位置制御コントローラは、スレーブ機構のピストン変位信号 P_{si} と、マスタ機構のピストン信号 P_{ri} を用いて、操作信号 O_{si} を計算し出力する。以上の電気・油圧制御系により、スレーブ機構は、マスタ機構に追従して動く。^{10)、11)}

(3) マスタ機構の構成

マスタ機構はオペレータが直接手で操作するものなので操作しやすい大きさであると同時に操作者が力感覚を得るのに十分な力を生じさせなければならない。また、パケット部分の位置・姿勢と可動範囲をスレーブ機構と合致させなければならない。そのためスレーブと幾何学的に相似なブーム・アーム・パケットの3つのリンクからなる多関節機構とした。マスタ機構の軽量化とアクチュエータの負担軽減のためにワイヤ駆動方式を採用した。ワイヤ駆動方式は、各部の関節軸にプーリを取り付け、基台部に設置したアクチュエータの動力をワイヤで伝達するものである。人間が操作しやすいように、軸間距離をスレーブ機構の 1/5 スケールとした(写真2)。

写真2 マスタ機構

各回転部はボールベアリングで支持され、各リンクにはカウンターウエイトを取り付け、重力による不釣合力を相殺している。操作者はパケット部に位置する操作ハンドルを持ってマスタ機構を操作する。操作ハンドルのパケット回転軸上に4軸力覚センサを取り付け、力覚センサの3軸成分を利用し操作者に働く力・トルクを検出する。角度変位はポテンションメータを各軸に取り付けて検出する。アクチュエータにはDCサーボモータを用い、これに減速器を組み

合わせて使用した。これによりオペレータは最大で 50[N] の力と 2.5[Nm] のパケット軸回りのトルクを力感覚として感じることが出来る。

(4) マスタ機構の力制御系

マスタ機構の力制御を図10～13で説明する。コンピュータにおいて、目標トルク τ_{ri} とマスタ機構のトルク τ_{mi} からモータ駆動信号 O_{mi} を計算し、D/A コンバータ、サーボドライバを介して電機子電流 I_{mi} が DC サーボモータに入力される。この電流によって DC サーボモータはトルクを生じ、減速器、アクチュエータプーリを介してワイヤを引っ張る。この力によって各軸にトルクが生じ、操作ハンドルを介して操作者に力感覚を伝える。角度変位信号 θ_{mi} 操作力信号 f_{mi} はコンピュータに取り込まれる。モータ駆動信号 O_{mi} の計算はコンピュータによって行われる。なお、この機構は本来3入力3出力系であるが動作速度が遅く各軸間の干渉は無視できるものとして、1入力1出力系3軸並列として扱った。

図11 オープンループ力制御システム

図12 クローズドループ力制御システム

図13 複合力制御システム

電機子電流と出力トルクがほぼ比例関係にあるという DC サーボモータの特性と電機子電流を制御するトルクコントロール型のサーボドライバの組み合わせから、力検出器を用いずにオープンループ制御のみで力覚を実現しようとする操作者は外乱の摩擦力を直接感じてしまう(図11)。そこで、操作者に作用している力 τ_{mi} を検出し、これをサーボモータにフィードバックすることで摩擦の影響の軽減を狙ったが、出力が半分程度しか得られない(図12)。結局、 $\tau_{mi} = \tau_{ri}$ を実現するために図13に示すように目標値にループゲイン K_i を加えて制御対象に入力する力制御システムとした。 K_i の値が大きいほど外乱の影響を軽減できるので、安定が保てる範囲でできるだけ大きい値をとるように系の挙動を見ながら K_i の値を決定する。($G_{mi}(s)$: 伝達関数)

(5) スレーブ機構の自重および摩擦力の補償法

スレーブ機構の力検出はシリンダの油圧力を利用する方法を採用した。シリンダ油圧力は、リンクの自重や摩擦等を含む荷重を検出することになる。そこで、あらかじめリンクの自重、摩擦係数、動摩擦力を実験または計算によって求めておき、姿勢、ピストン速度、移動方向によって、マスタ機構への目標トルクを計算するときに、これらの値を差し引いて自重、粘性摩擦、動摩擦力の補償を行う。

3-3 実験および実験結果

マスタ・スレーブ機構の制御効果を確認するために以下の実験を行った。実験において、力の伝達倍率は $\alpha=0.003$ 、変位の伝達倍率は $\beta=1$ とした。

図14 マスタとスレーブの変位追従性

図15 マスタとスレーブの力の追従性

図16 マスタ機構の周波数特性

(1) 変位および力の伝達特性に関する実験

a. 変位の追従性に関する実験

マスタ機構を操作者が手で操作したときのマスタ機構の角度変位 θ_{mj} とスレーブ機構の角度変位 θ_{sj} の波形を図14に示す。これによってスレーブ機構がマスタ機構の変位に追従していることがわかる。

b. 力の追従性に関する実験

操作者が操作ハンドルを保持し、スレーブ機構に外部から力を加えたときのスレーブ機構に生じるトルク τ_{sj} とマスタ機構に生じるトルク τ_{mj} の波形を図15に示す。

操作者のハンドル操作の仕方に影響されるのを防ぐため操作ハンドルをバネによって支持し、目標信号 τ_{sj} を外部より入力し、マスタ機構によって生じるトルク τ_{mj} を出力として周波数特性を測定した。この実験結果と計算結果を図16に示す。これによってマスタ機構がスレーブ機構に生じているトルクを操作者に伝えていることが示されている。

図17 補償の効果

(2) スレーブ機構の自重および摩擦力の補償効果の実験

a. 粘性摩擦・動摩擦力に対する補償の効果

粘性摩擦・動摩擦力に対する補償の効果を確認するために、粘性摩擦の影響が強くなるように早く動かすことができ、自重の影響が最も少ないバケット軸を用いて実験を行った。スレーブ機構を無負荷状態にし、操作者がマスタ機構を操作した時のマスタ機構に生じる操作トルク τ_{mj} を観察した。

図17(a)の中で示すAは自重・摩擦力補償を行わないとき、Bは自重・摩擦力補償を行ったとき、Cはスレーブ機構の力に関係なくマスタ機構の力制御系に $\tau_{sj}=0$ を入力したときのマスタ機構の操作トルク τ_{mj} の波形を図17(a)に示す。スレーブ機構は無負荷状態なので、スレーブ機構に作用する外力が測定できれば、操作トルクはCとなる。シリンダの油圧力より検出したスレーブ機構のトルクは摩擦力を含むのでマスタ機構の操作トルクはAとなる。補償を行うことによってBとなり、補償の効果が確認できる。

b. 自重に対する補償の効果

自重に対する補償の効果を確認するために、最も自重の影響を受けるブーム軸を用いて実験をした。この実験のために、スレーブ機

構の先端に力検出器を取り付け、スレーブ機構に外部から作用するトルク τ_{sl} を直接測定できるようにした。スレーブ機構に外部よりトルクを加え、外部より加えたトルク τ_{sl} 、マスタ機構によって操作者に伝わるトルク τ_{ml} の波形を観察する。この実験を自重、摩擦力補償を行ったもので行わないものについて行った。実験結果を図 17 (b) に示す。外部より作用するトルク τ_{sl} が正方向の片振れの負荷であるのに対し、検出されるトルク τ_{sl} はスレーブ機構のリンクの自重分ずれた値になり、マスタ機構の操作トルク τ_{ml} は τ_{sl} に追従し自重に相当する負のトルクが生じる。補償を行うことによって自重が補正され、負のトルクが生じなくなり、補償の効果が得られる。

3-4 この項のまとめ

- (1) 位置制御・力帰還型バイラテラル制御系により、操作者はスレーブ機構の変位を正確に追従操作するとともにスレーブ機構に生じている力を力感覚として知ることができる油圧式マスタ・スレーブ機構を構成した。
- (2) DC サーボモータとトルク制御サーボドライバの特性を生かした力制御系によってマスタ機構は容易に操作者に対して力感覚を伝えることができることを示した。
- (3) 油圧シリンダの内圧からスレーブ機構に生じる力を検出することによる欠点を補うために、自重と摩擦力に対する補償方法を提案し、実験によってその効果を確認した。
- (4) 現在のものは、オペレータとタスク間ですべての動作を逐次送るマニュアルコントロールでありオペレータに負荷がかかっている。このことから、タスク側にローカルなコンピュータを配しオペレータから送られたマクロな命令を解釈し実行可能なシーケンスにしてアクチュエータに働きかけ、タスクからのフィードバックも整理してオペレータ側に送るスーパーバイザリコントロールの検討の必要性が出現した。
- (5) 今回の実験装置では、人間工学の見知上から最大負荷トルクを 2.0 [Nm] と設定し、マスター・スレーブの力伝達比を $\alpha = 0.003$ に限定して行った。そのため、力伝達比の違いによる追従性、変位に及ぼす影響は明確に記すことはできないが、 α の値が小さいほど力の追従性は悪くなると考えられる。次の段階でより大型およびより小型の実験装置で人間工学系との関わりとともに実証する必要性が生じた。

4. おわりに

近年、建設作業のロボット化が活発になってきたが、ロボット自身が移動しなければならないとか、対象とするものの作業条件がその都度変わる等のため、自動化より遠隔操縦によるものの方が実用化例が多い。これはロボットと人間がそれぞれの優れた点を組み合わせさせて効率よい作業を目指そうとするものである。

その時、視覚をはじめとする人間への提示技術が未熟であると、作業能率が低下しコストアップになったり、生理的な違和感が発生し人間にとって不都合なものになってしまう。建設作業は大負荷から繊細さまでその対象とする範囲は広い。力伝達比や疲労など人間工学的観点からの詳細な研究やエキスパートシステム、ファジー制御によるシステムの一部を自動的に制御する研究を進めなければならない。

本研究の成果が、建設分野で使用の多い油圧式多関節マニピュレータの遠隔操縦技術の発展に役立ち、危険な地下や高所の作業で活発化することを期待したい。そのなかでも、壁面走行装置に作業アームを取り付けてカメラで監視しながら壁面の補修作業を実現して、無足場化による建設作業の安全性向上を望みたい。

謝辞

本研究の内、油圧式マスタ・スレーブの各種実験にあたっては、武蔵工業大学の佐藤三祿教授のご指導をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本秀紀：人工現実感とロボット、日本ロボット学会誌、Vol 10・No. 7, pp59~64、1992
- 2) 館すすむ、広瀬道孝：バーチャル・テック・ラボ、工業調査会、pp11~132、1992
- 3) 館すすむ：テレロボティクスの世界、日本ロボット学会誌、Vol 10・No. 6, pp2~4、1993
- 4) 伊福部達：人工現実感と触覚、日本ロボット学会誌、Vol 10・No. 7, pp41~48、1992
- 5) 服部桂著：人工現実感の世界、工業調査会、pp15~30、1991
- 6) 日経エレクトロニクス・9-26、日経BP社、pp67~85、1994
- 7) 畑田豊彦著：奥行き知覚特性、Opeluse、pp108~118、1985
- 8) 鷹巣征行著：臨場感をもった遠隔操縦ロボット、第3回建設ロボットシンポジウム、pp49~54、1993
- 9) 鷹巣征行、佐藤務、遠藤健、柳原好孝：建設作業用マニピュレータの遠隔臨場制御について、第4回建設ロボットシンポジウム、pp57~64、1994
- 10) 鷹巣征行、柳原好孝、佐藤務共著：遠隔臨場マニピュレータ、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会92講演論文集、pp181~185、1992
- 11) 鷹巣征行著：日本大学生産工学部第29回学術講演会、日本大学生産工学部、1996
- 12) 山本欣一、柿倉正義：極限作業ロボット-そのメカニズムと設計技術、工業調査会
- 13) 佐藤方彦：マンマシン・インターフェイス、朝倉書店発行、1989
- 14) 広瀬道孝：日本音響学会誌、49巻7号、1993

(1997年9月22日原稿受理、1998年3月16日採用決定)