

# 人に優しい建設ロボット遠隔操縦技術の研究（その2）

柳原 好孝\*

要約： 危険地帯や過酷な作業環境下で建設ロボットを遠隔操縦する場合、これまで作業状況の提示方法はオペレータにとって決して良好なものではなく、疲労感や違和感が発生し、長時間の運転が難しいとされていた。

本論文では、遠隔操縦時の違和感として考えられる立体視、力覚提示についてその改善策を提案し、実験結果をもとにその有効性を示す。

まず、視覚提示に関しては、開発した左右眼独立駆動の立体視可能なカメラ装置を使用し、利き眼を含めたオペレータの個人差を考慮した場合と理論上の輻輳角の違いについて述べる。

また、力覚提示に関してはマスタへの反力提示として機能的電気刺激（F E S）を利用し、スレーブ装置であるロボットアームの操作性を確認した。

キーワード： 建設ロボット、遠隔操縦、立体視、機能的電気刺激

- 目次： 1.はじめに  
2.個人差を考慮した視覚表示方法の評価  
3.機能的電気刺激による力覚提示  
4.おわりに

## 1. はじめに

災害地や過酷環境下での作業において、建設機械や建設ロボットを運転する場合、オペレータを二次災害の発生する恐れのある危険な場所に派遣することは、労働安全上避けなければならない。しかしながら、人命救助を伴う緊急工事や人間でなければ復旧できない作業については作業を実施しているのが現状である。

筆者らはこれまでに建設ロボットを遠隔操縦するためのインタフェースである視覚や力覚提示について研究を進めてきた<sup>1)2)</sup>。前報告<sup>1)</sup>では、さらに一步人間にとってより使いやすいインタフェースの立場に立ったシステムを構築する目的で、建設ロボットの遠隔操縦時にオペレータが感じる違和感や疲労感を軽減することができると思われる左右独立駆動の立体視可能なカメラ装置について提案し、概要について報告した。また、力覚提示に関しては機能的電気刺激（F E S）を採用する方法を提案し、パワーショベルの遠隔操縦を例にその有効性を示した。

今回の報告では、前年度に構築したシステムを使用し、人間にとって使用しやすいものにな

っているか、視覚と力覚について評価を行った結果について述べる。

## 2. 個人差を考慮した視覚提示方法の評価

### 2.1 実験目的

前報告<sup>1)</sup>で示したシステムを用い、さらに超音波距離計で物体間距離を計測し、瞳孔間距離及び利き眼、斜視あるいは光学的な特性による個人差を輻輳運動によって補正し、個人各々の視覚特性に合わせた輻輳調整システムを構築することを目的とした。まず、輻輳運動の個人

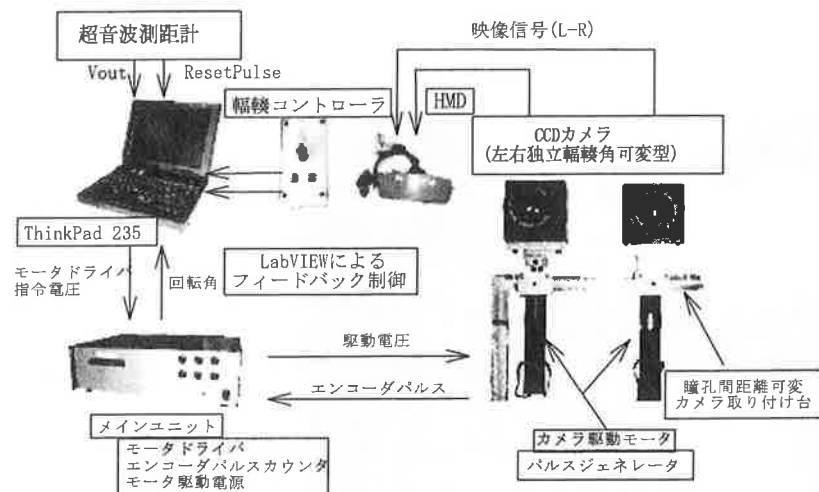


図1 輻輳角左右独立可変システム実験装置

\*メカトロ研究室

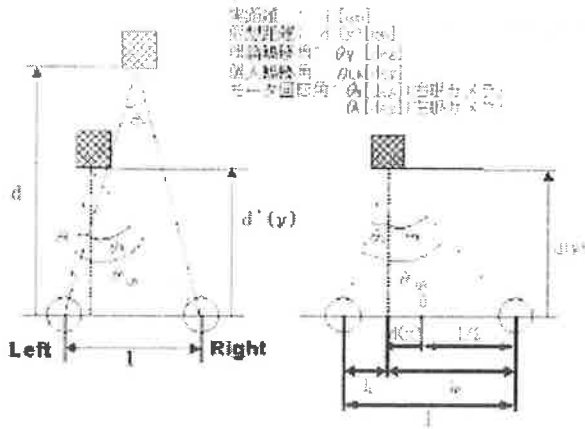


図2 理論輻輳角と個人輻輳角

差を計測し、その結果を評価することとした。図1に実験で使用した実験装置を示す。

## 2.2 実験方法

### 1) 理論輻輳角と個人輻輳角

図2に理論輻輳角および個人輻輳角を示す。理論輻輳角  $\theta_v$  [deg]とは左右対称な理論的な輻輳角を指し、個人輻輳角  $\theta_{LR} (= \theta_L + \theta_R)$  [deg]とは被験者が最も、違和感を感じない映像が表示されたときの左右非対称な輻輳角を指す。

### 2) 利き眼の定義

利き眼とは利き腕と同様の意味として用いられ、主として物体を見るときに用いている眼球を指す。近年の統計では右眼利きが多いことが分かっている。右眼利きの男性は63%、女性は57%、左眼利きは男女とも10%以下である（他は両目利き）

### 3) 実験条件

理論輻輳角と個人輻輳角との関係を見いだすために対象物体指標を一定距離（150mm～22,00mmを100mmピッチ）に置き、被験者6名が自身で輻輳角を輻輳コントローラで調節する。その際、被験者が以下の条件を満たし



図3 実験状況

たときの左右カメラの角度、および個人輻輳角測定を実施した。また、各被験者について利き眼の測定を合わせて実施した。

図3に実験の様子を示す。

- ①HMDおよびカメラ間距離を被験者の瞳孔間距離に合わせる
- ②対象物体指標は中央に配置されているので像の位置が見かけ上中央になるように調節
- ③②の条件が満たされたら、二重像が見えないような位置（融像範囲）になるように左右のカメラを独立に操作する
- ④ 以上の作業を各距離5回繰り返す。なお、各モータの回転角は実験毎に原点に戻される。

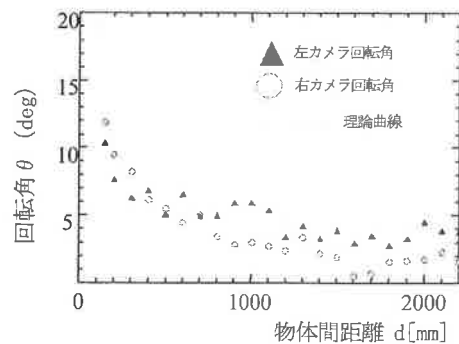


図4 左右回転角比較

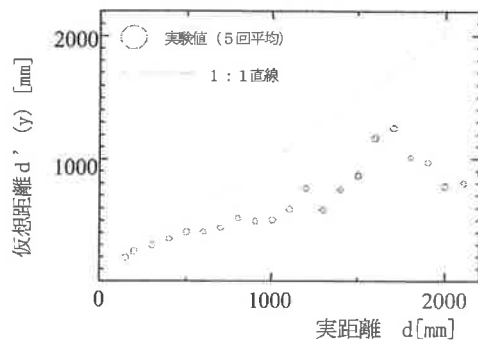


図5 実距離 d と仮想距離 d' の関係

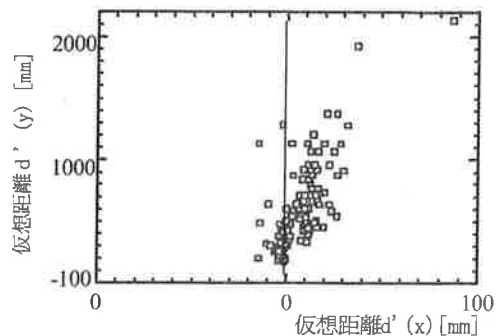


図6 注視点算出結果

実験では各被験者の各距離における個人輻輳角  $\theta_{LR}$ [deg]をDCサーボモータの回転角  $\theta_R$ [deg] (右眼カメラ),  $\theta_L$ [deg] (左眼カメラ) により計測し, 求める。

ここではまず, 個人輻輳角と理論輻輳角の間には差異が見られるか検証することが重要となる。この差異を定量的に評価するために今回独自に注視点という表現方法を用いた。注視点とは, 物体が置かれていた実位置(0,d)に対して図2のようにDCサーボモータの回転角,  $\theta_R$ ,  $\theta_L$  の値から, 被験者が最適と評価した輻輳角 (個人輻輳角) の交点 ( $d'(x), d'(y)$ ) [mm] を指す。

### 2.3 実験結果および考察

以下に代表的な被験者の実験結果を示す。被験者は, 事前の測定で利き眼は右眼, 瞳孔間距離 74mm であった。

図4は回転角と実距離の関係を示したものである。特長として, 利き眼である右眼は, 理論値 ( $\theta/2$ ) よりわずかに大きく, 左眼は理論値よりもさらに大きい。また, 利き眼ではない左眼の回転角の変化には, ばらつきがある。

図5に仮想距離  $d'(y)$  と実距離の関係を示す。実距離に比べ, 仮想距離が常に近方にあり, その傾きはほぼ一定である。

次に, 利き眼の影響をみるために, 左右眼の中心からのずれ量である仮想距離  $d'(x)$  と  $d'(y)$  の関係を図6に示す。

水平方向の注視点は利き眼である右眼の方に合わせる傾向にあり融合範囲は右側に広い。

また, その傾向は遠距離であるほど強い。

以下に, 全被験者における共通の事項について考察をまとめる。

- ①全被験者で実距離よりも仮想距離の方が同等かそれ以下である。
- ②半数の被験者において 2000mm 付近で仮想距離が実距離の約  $1/2$  である
- ③個人輻輳角と利き眼の関係については2種がある
- ④1つは, 利き眼はあまり調整せずに利き眼ではない方を調節している傾向がある
- ⑤もう1つは, 利き眼である眼の方を主に調節している傾向
- ⑥利き眼ではない方で調節する場合, 角度にばらつきが多い

以上のことから, 利き眼と調節する眼との関係にことなる点があるものの, 理論輻輳角に比べ, 対象物を近くに見ていることと, どちらかの眼の一方を大きく調節していることが分かった。

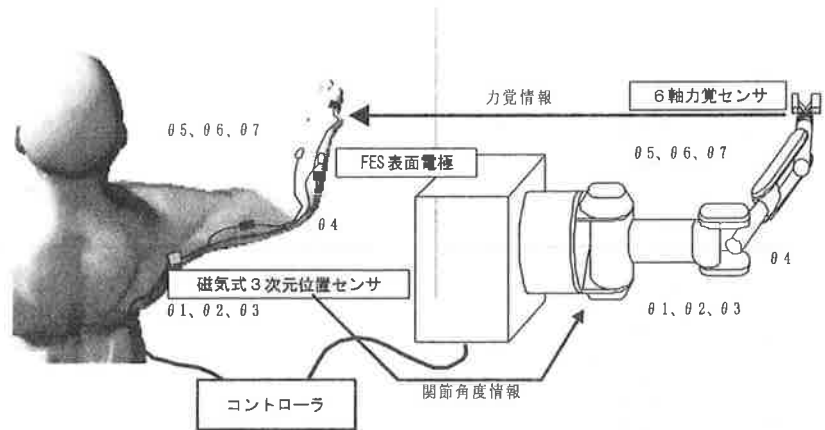


図7 遠隔操縦システム

これにより, 個人輻輳角のデータをシステムに反映することで通常オペレータがとっている輻輳運動を再現することが可能であると考えられる。

## 3. 機能的電気刺激による力覚提示

### 3.1 実験目的

これまでスレーブ側に使用していたミニパワーショベルとは別に, 今回新たにスレーブ側をロボットアームとした図7に示す遠隔操縦システムを構築した。

これは, ミニパワーショベルで実験した3自由度から6自由度に動作を拡張するもので, 力覚提示を前腕のみから上腕までとすることができる。つまり, このシステムにより人間の肩腕と同等の力覚提示が可能となりFESによる力覚提示の有効性を評価することができる。

### 3.2 システムの概要

オペレータの腕には磁気式位置センサの受信器が2カ所に張り付けてあり, 磁場発生装置 (トランスミッタ) からみたそれぞれの受信器の三次元座標と姿勢を計測することができる。それらの値をもとにオペレータの腕の角度 (7自由度) を計算している。これをロボットアームへの指令信号として制御装置へ入力し, ロボットアーム (6自由度) が動作する。したがって, オペレータは受信器を貼り付けた自分の腕を動かすだけでロボットアームの6つの関節を同時に動かすことができ, ロボットアームはオペレータの腕と同じ姿勢をとる。オペレータはあたかもロボットアームが自分の腕になったような感覚でロボットアームを操縦することができる。

ロボットアームの先端には6軸力覚センサを取り付けてあり, 対象物に触れることでロボットアーム先端に発生する力とモーメントを計測することができる。それらをもとにロボットアームの各関節に発生するトルクの静力学的な解析・計算を行っている。計算したトルクをもとにオペレータの腕にFESを行い肘を伸ばす動きに対する反力, 手首を掌側に曲げる動きに対する反力, 手首を親指側に曲げる動きに対する反力の提示を行う。

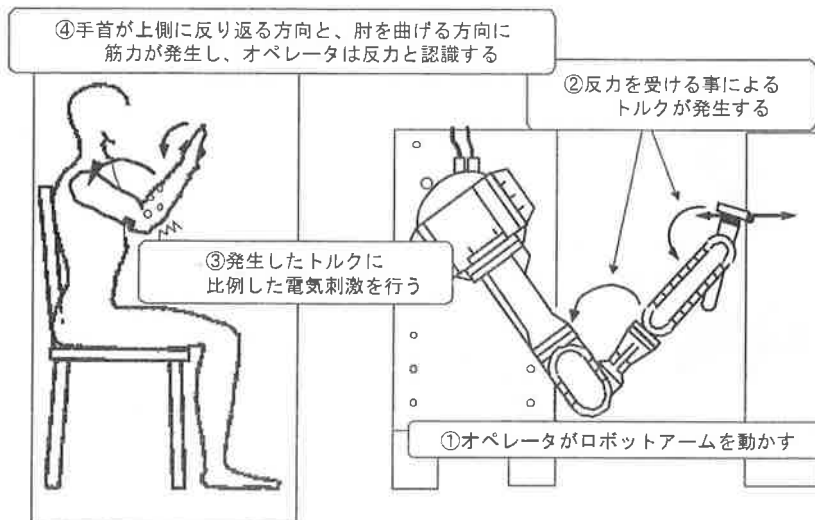


図8 反力提示

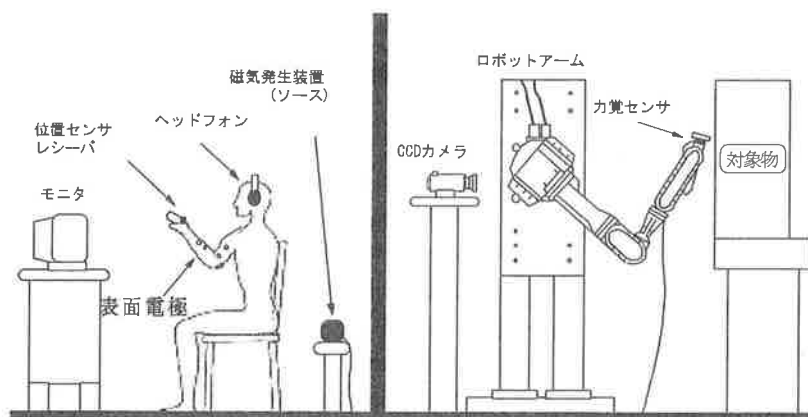


図9 実験配置図

これにより、オペレータの腕にFESのための小さな表面電極を貼り付けるだけというシンプルな形で反力を提示できるということが可能となっている。

### 3.3 反力提示方法

ロボットアームが反力を受けているときに、オペレータへの反力提示を行う。今、図8に示すように腕を伸ばすことでロボットアームを動かす、エンドエフェクタが壁面に接触したとする。エンドエフェクタが反力を受けるとロボットアームの各関節にトルクが発生する。この発生したトルクに比例するような電気刺激をオペレータが腕を動かしている方向とは逆向きの方向に腕が動くような筋に対して行う。オペレータの腕に本人の意志とは無関係に、動かしている方向とは逆向きの方向に腕が動くような筋力が発生するのでオペレータはそれを反力として認識するというものである。

本研究では、電極を前腕（長橈側手根伸筋、尺側手根伸筋）に2カ所、上腕（上腕二頭筋）に1カ所、それぞれ1対づつ取り付けFESを行い、筋力を発生させて、

肘を伸ばす動きに対する反力、手首を掌側に曲げる動きに対する反力、手首を親指側に曲げる動きに対する反力の提示を行う。

## 3.4 接触判定実験

### 3.4.1 実験方法

本研究で提案するインターフェースの有効性を検証するため、2つの実験を行った。まず、このシステムによつての対象物の位置を認識することができるのかを検証する実験を行った。

本システムを用いて、被験者にロボットアームを遠隔操縦させる。対象物に触れるまでエンドエフェクタを近づけ、接触したと認識できたところでエンドエフェクタを壁から離すという実験を、反力提示がある場合とない場合で、被験者6名で5回づつ実施した。実験時におけるロボットアームやオペレータの配置は図9に示す。

対象物は床面との摩擦力を越える力が加わると移動するが、その最大静止摩擦力は29.4N、動摩擦力は19.6Nであった。

以下に実験手順を示す。

- ① 被験者のロボットアーム操縦による本システム動作確認と修練
- ② 擬似的な遠隔操縦環境で実験を行うため、ロボットアームが対象物に触れる作業現場を被験者が直接観察しないように、CCDカメラとモニターを用い視覚情報の提示を行う。実験中は被験者にイヤフォンを装着させ、作業現場の聴覚情報は遮断する。
- ③ 被験者には「ロボットアームを操縦して対象物に触れたと認識したらロボットアームを引いて下さい」という指令のもと、作業を実施させる。
- ④ 対象物が移動した距離を測定して評価を行う。

### 3.4.2 実験結果

対象物接触判定実験の結果を、表1、図10に示す。表1は、被験者毎の対象物が動いた距離の平均値を、図には全体の平均値と標準偏差を表している。これから、反力提示がある方が、個人差があるものの、対象物の移動量が少ないという傾向があるということがわかる。これは、CCDカメラからの画像だけでは作業に必要な情

表1 被験者毎のFES実験結果

	対象物体移動距離 (mm)	
	FESあり	FESなし
被験者A	4.1	9.4
被験者B	5.1	12.0
被験者C	3.8	7.5
被験者D	10.9	12.5
被験者E	7.1	7.7
被験者F	18.9	17.4
平均	8.31	11.08

報が不十分であり、FESによる反力提示による力覚情報が補った結果であると考えられる。

3.5 ならい動作実験

3.5.1 実験方法

次の実験として、対象物の位置の認識と、押し付け力の制御を行う実験を行った。

前述の実験同様の遠隔操縦システムを用いて、ロボットアームを操縦する。まず、オペレータは肘を約90度に曲げ、掌を壁面に向けた（前腕の回外、回内角度が約90度）準備の姿勢をとる。オペレータはロボットアームを準備の姿勢から操縦をスタートさせ、エンドエフェクタが垂直面に接触するまでロボットアームを伸ばす。一度接触したらそのまま垂直面に対し、無負荷で状態を下方に移動させる実験を行った。被験者は、目隠しし、視覚情報は一切与えず、FESによる反力提示と聴覚情報のみの提示とした。

実験時における配置を図11に示す。

3.5.2 実験結果

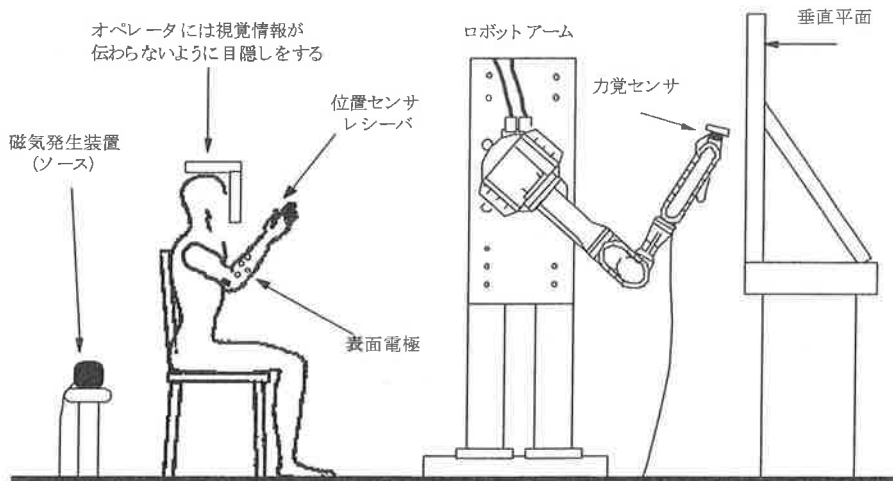


図11 ならい動作実験の配置図

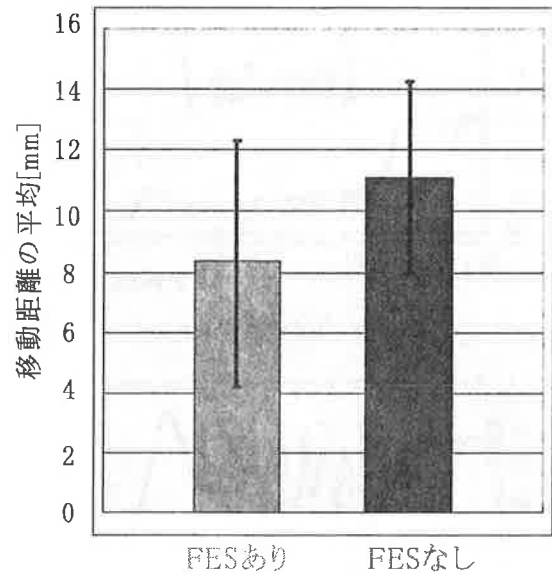


図10 接触判定結果

図12～図14に実験開始から10～40秒の区間におけるオペレータの腕の角度、反力提示を行っている軸のロボットアーム側に発生しているトルク、垂直面が受けている力を示す。図13からエンドエフェクタは初めに垂直面に接触した直後に1度だけ垂直面からはなれ、その後反力を受けることによるトルクが発生している、エンドエフェクタは常時垂直面に接触していることがわかる。

図14は垂直面が受けている力を示しているが、エンドエフェクタが垂直面に触れていると推測される区間における力を見るとほぼ一定の振幅の範囲内で垂直面を押しているということがわかる。

以上のことより、オペレータはFESによる反力提示により、ロボットアームが垂直面に触れている感覚が伝わってきて、なおかつどの程度の反力を受けているのが判断可能であるといえる。

5. おわりに

今回の報告では、以下の2つの課題についてその有効性を示す目的で行った実験により何点かの改善点を見出すことができた。

まず、第一に視覚に関しては遠隔操縦時の違和感・疲労感について問題を提起し、その解決手法として立体視における輻輳角の個人差を考慮したシステムの構成方法を提案した。

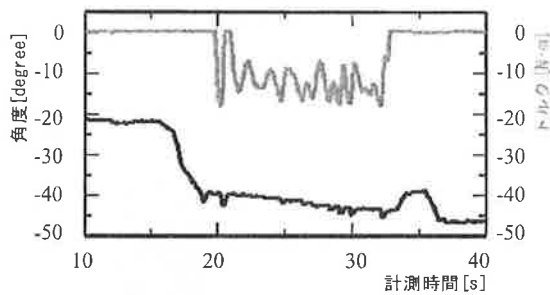


図 1.2 手首の角度・トルク

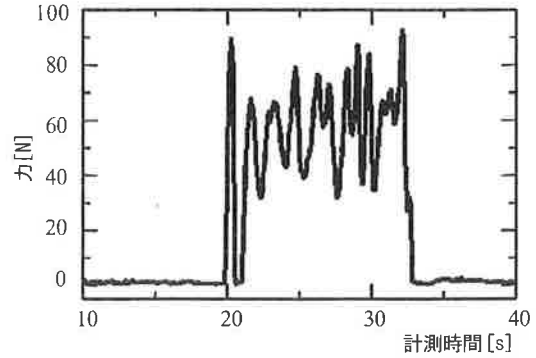


図 1.3 肘の角度・トルク

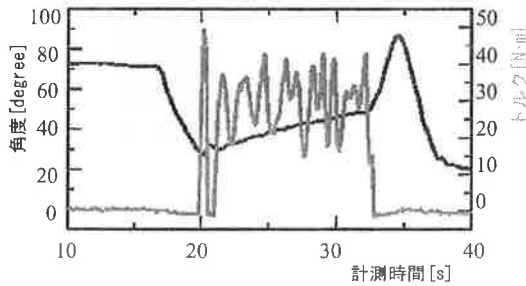


図 1.4 垂直面の受ける力

のみの力覚提示を行っていたものを上腕にまで拡張することができた。また、ロボットアームを使用しその有効性を示すことができた。

今後、解決しなければならない課題として、視覚に関しては、今回得られた輻輳運動の個人差データを数式化し、システムの動作プログラムとして構築することなどがあげられる。

また、力覚提示に関しては、ものを持つなどの動的な評価が今後必要となる。

つぎに、これまでミニパワーショベルを使用し、前腕

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、「視覚提示方法の評価」の研究に関しては武蔵工業大学工学部機械システム工学科富田教授、田中助教授、「機能的電気刺激による力覚提示装置」の研究に関しては、秋田大学工学資源学部機械工学科大日方教授のご指導いただき深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 柳原 好孝：機能的電気刺激を用いた反力提示システムの開発，東急建設技術研究所報 No23,pp.287-292,1997年
- 2) 柳原 好孝：機能的電気刺激を用いた建設ロボット遠隔操縦技術の開発，東急建設技術研究所報 No24,pp.227-232,1998年
- 3) 村上 龍大,長谷川 清泰 他4名：機能的電気刺激を用いた遠隔操縦システムの開発，計測自動制御学会第14回ヒューマン・インタフェイス・シンポジウム論文集，pp277-280,1998年
- 4) 柳原 好孝：人に優しい建設ロボット遠隔操縦技術の研究，東急建設技術研究所報 No25,pp.153-156,1999年

## AN STUDY OF TELEOPERATING CONSTRUCTION ROBOT TO THE HUMAN BEING

Y.Yanagihara

When a construction robot was operated under the danger area and the bitter working environment as to the distance, the way of presenting it of the working conditions was never good for the operator, but fatigue and the sense of incongruity occurred, and thought that long operation was difficult so far.

That reform measure is proposed about stereo vision which it can think about as a sense of incongruity in the remote operation, force feedback, and that validity is shown by this thesis in the place.

First, it became clear that working efficiency improved when a difference in the operator including the effect was taken into consideration about the sight presentation by using the stereo camera device of the developed left-right eye independence drive could.

Moreover, functional electric stimulus was used about the force feedback as an anti-power presentation to master, and the operation of manipulator which is slave device was confirmed.