

遠隔操作における  
能動立体視の効果と生理指標を用いる評価法

非会員 黒木雅嗣 非会員 嶋 哲男  
非会員 大川明宏 非会員 河野 治 (新日鉄)  
非会員 館 章 (東大工)

Effect of an active binocular display and the way of estimation of the effect by physical data  
in teleoperation.

Matsutsugu Kuroki, Non-member Tetsuo Shima, Non-member  
Akihiro Okawa, Non-member Osamu Kawano, Non-member (Nippon Steel Corp.)  
Susumu Tachi, Non-member (University of Tokyo)

Teleoperation is valuable for steel makers to mechanize or automate highly what cannot have been done. One of the most important problems in teleoperation is to give operator a sensation of presence.

We made a Teleoperation master slave manipulation system to be composed of an active binocular display, a 3-D camera, a master arm and a slave robot. Some vision types were experimented the capacity of remote operation. It is proved that the active binocular display is superior to the 2-D plane visual one and that R-R value and beta wave are possible to estimate an effect of operation, as a result of the experiments.

キーワード：テレオペレーション、立体視、生理指標

1. まえがき

製鉄業では、コスト削減、3K作業追放やワンマン作業による疎外感防止などの労働環境の整備を目的に自動化を推進してきているが、従来のシーケンシャルな制御による自動化は多頻度多人数で定型画一的な作業を対象として適用してきた。その結果、現在残存する人手作業は多種多様であり、少頻度少人数作業で広範囲に散在しているため、これらの人手作業の自動化は経済的困難さに加え高度な認識判断能力を不可欠とするものが多く、従来の自動化方法では限界があった(図1、図2)。

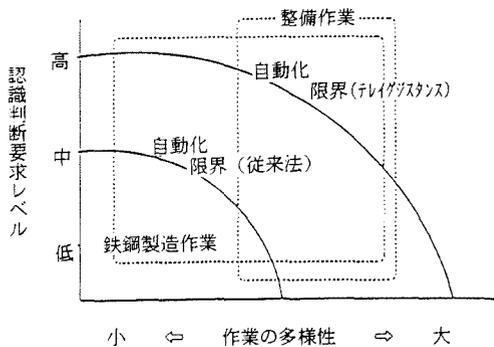


図1 作業の多様性から見た自動化拡大領域

Fig.1. Automation's area on the diversity of operations.

これらの課題を解決する手段として、テレオペレーション技術の有効性に期待がもたれている。テレオペレーション技術は、作業者が臨場感をもって、遠隔現場の情報を入手し遠隔現場の機械を操作することができることから、作業者の認識判断能力を生かし、散在する複数の作業を1箇所管理することが可能となる。このような特徴のため、テレオペレーション技術を適用する場合に問題となるのは、目標とする臨場感に対して現状ではシーズ技術の限界から作業者に対して操作に必要な十分な遠隔情報を伝達できないために作業性を著しく低下させたり、作業者にある程度付

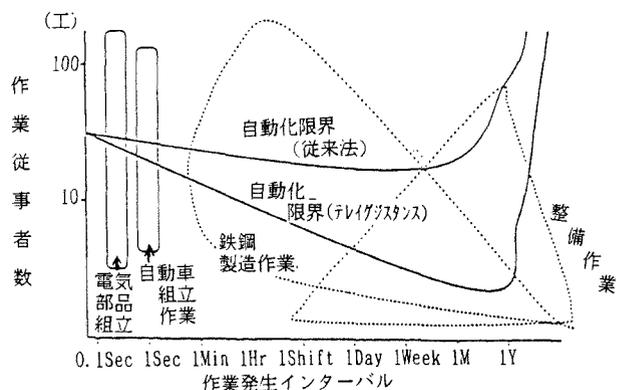


図2 作業規模で見た自動化拡大領域

Fig.2. Automation's area on the scale of operations.

与される拘束感、負担感のため作業者はストレスを感じてしまうことである。

本研究では、新たに開発した立体視覚システムと汎用ロボットからなるテレオペレーション実験装置を用いて遠隔操作における視覚情報提示系の違いによる作業性の比較と作業者のストレスを定量的に評価する試みをしたので報告する。

## 2. テレオペレーション実験装置

製鉄現場へテレオペレーション技術を適用する場合、遠隔現場の情報として最も重要となるのは視覚情報である。そこで、今回は視覚系として作業者の視点の動きに追従可能な視点変更機能のついた立体視覚システムを採用し、触覚・作業系としてのマスターアーム・スレーブロボットと組み合わせたテレオペレーション実験装置(図3、表1)を構築した。

以下実験装置の概要を説明する。作業者は遠隔現場に設置した立体カメラによりヘッドマウントディスプレイ(HMD)を介して遠隔の視覚情報を立体画像として入手する。ここで立体カメラは3軸の回転運動可能な架台上に設置されていて磁気センサーにより検出したHMDの位置に連動して立体カメラの視点変更を可能としており、また作業者足元のフットペダルでズーム操作を可能としている。作業者は立体画像による遠隔情報を基にマスターアームを用いて現場の汎用6軸ロボットを操作できるようになっている。尚、HMDの光学系の設計には、館<sup>(1)</sup>の方法を用いた。

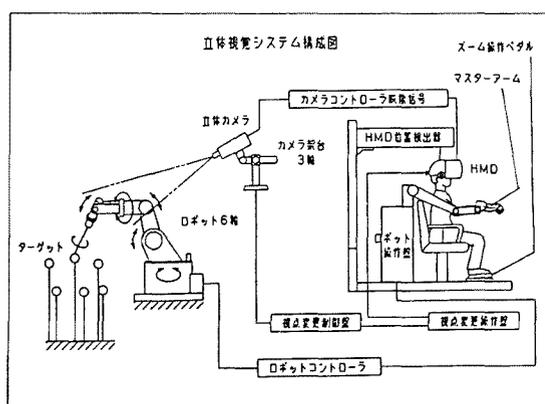


図3 テレオペレーション実験装置  
Fig.3. Teleoperation system.

表1 テレオペレーション実験装置主仕様  
Table.1. Specifications of a teleoperation system.

	マスター装置		スレーブ装置	
視覚	立体提示方式	両眼式HMD	カメラ	1/2" 彩-3CCD ×2 基
	ディスプレイ	液晶5.61インチ×2	レンズ	f=8~80mm
	位置検出	3次元磁気センサー	カメラ架台	3軸回転
	視野/分解能	40° / 0.3 4° / 2.0	応答遅れ	HMD ~スレーブ間 150msec 以内
触覚	操作端	6軸マスターアーム	ロボット	6軸30kg可搬

## 3. 生理反応評価実験

### 3-1 実験方法

作業の難易度と作業者の生理反応(心拍R-R値と脳波出力)との関係性を評価するため以下の実験を行った。

- (1)実験方法: 1個の固定ターゲットと1個の可動ターゲットへ交互に10回ロボットハンドの位置合わせをする。
- (2)実験装置: テレオペレーション実験装置(但し視覚は肉眼)とターゲット移動装置(清水機電製IAシングルサーボ)
- (3)ターゲット: 直径4.3mmのボール2個で1つは固定、1つは可動。可動ターゲットは、ストローク300mm間で乱数発生させた目標位置に対して連続的に移動している。
- (4)被験者: 遠隔操作に熟練した者1人×各4回
- (5)比較条件: 可動ターゲット側を固定、または移動速度10mm/秒、100mm/秒の難易度の異なる3種類の作業で比較。
- (6)測定項目: 心拍(竹井工業製心拍メモリ装置)、脳波(ランダムエレクトロニクスデザイン社製IBVAを用いて測定)

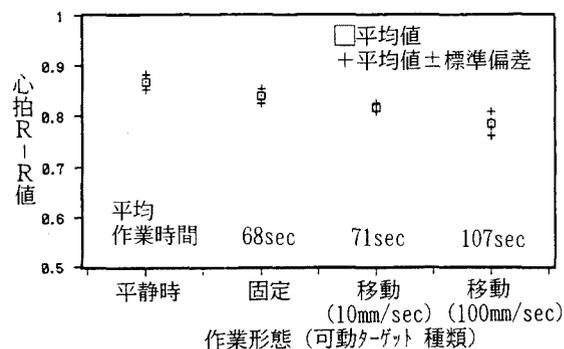


図4 作業の難易度による心拍(R-R)値  
Fig.4. Comparison result of R-R value.

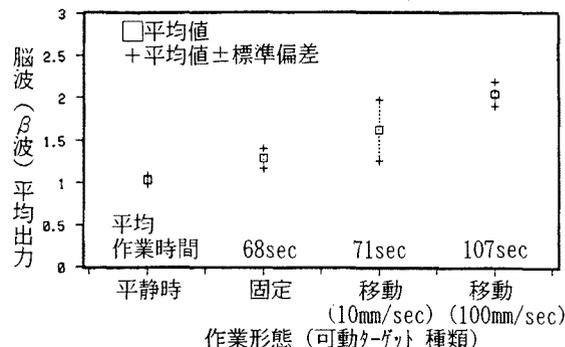


図5 作業の難易度による脳波(β波)出力  
Fig.5. Comparison result of beta wave.

### 3-2 実験結果

今回の実験では作業の難易度による比較を実施目的としているが、可動ターゲット以外の実験条件は全て同じであるため、作業の難易度として固定、移動(10mm/sec)、移動(100mm/sec)の順に高くなっていることは明らかである。

そこで、作業の難易度による作業中の心拍(R-R平均)の測定結果を図4に、作業の難易度による作業中の脳波( $\beta$ 波: 脳波出力 20~30Hz分)の測定結果を図5に示す。

作業の難易度が高くなるにしたがい心拍(R-R平均)が低くなり、 $\beta$ 波平均出力は大きくなっており、作業の難易度と心拍(R-R平均)と $\beta$ 波平均出力に相関がみられる。したがって、作業の難易度評価法として心拍(R-R平均)と $\beta$ 波は有効であると考えられる。また、ストレスが加わると心拍(R-R平均)が下がる<sup>(2)</sup>ことから判断して、作業の難易度が上がるにつれ作業者はストレスを高く感じている。これは被験者の主観的評価と一致しており、ストレスと脳波( $\beta$ 波)とは関連があることがわかる。

### 4. 画像提示方式評価用遠隔操作実験

#### 4-1 実験方法

画像提示方式の違いによる遠隔操作の作業性とストレスを評価するため以下の実験を行った。

- (1)実験方法: 6個のターゲットへのロボットハンドの位置合わせ
- (2)実験装置: テレオペレーション実験装置
- (3)ターゲット: 直径4.3mmのボールを左右400mm間隔×奥行3列300mm間隔で配置
- (4)被験者: 遠隔操作に熟練した者1人×各3回
- (5)比較条件: 肉眼(機側)、平面モニター(平面視)、HMD~視点固定(立体視の映像提示で立体カメラ架台の運動無し)、HMD~視点変更機能有り(立体視の映像提示で立体カメラ架台の追従運動有り)で比較
- (6)測定項目: 作業時間、成功率、心拍、脳波(心拍は竹井工業製心拍メモリー装置、脳波はランダムエレクトロニクスデザイン社製IBVAを用いて測定)

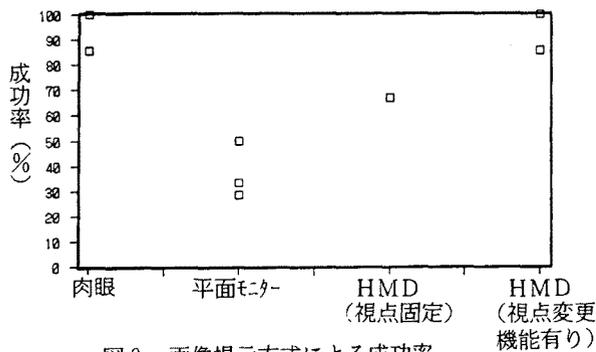


図6 画像提示方式による成功率  
Fig. 6. Comparison result of achievement rate.

### 4-2 実験結果

#### (1)成功率と作業時間

成功率と作業時間の結果を図6、図7に示す。成功率はターゲット個数/試行回数とした。

画像提示方式に関わらず、成功率が上がると作業時間が短くなり、成功率と作業時間には相関があることがわかる。

成功率では、肉眼とHMD~視点変更機能有りが同程度ではほぼ100%であり、次いでHMD~視点固定が70%、平面モニターが30~50%となっている。また作業時間では、HMD~視点変更機能有り、肉眼、HMD~視点固定、平面モニターの順で作業時間が短くなっており、立体

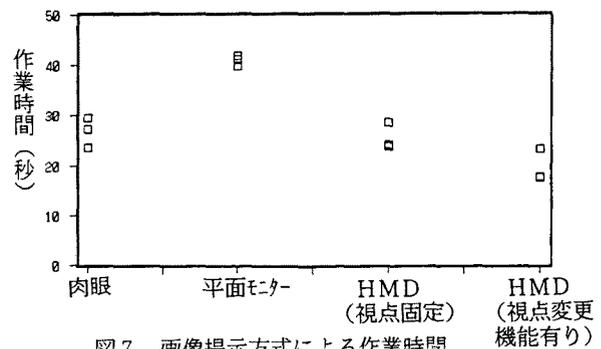


図7 画像提示方式による作業時間  
Fig. 7. Comparison result of operation time.

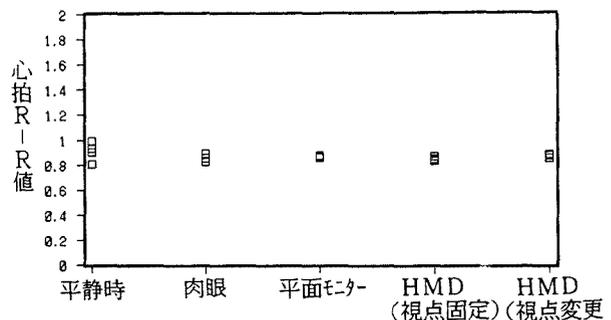


図8 画像提示方式による心拍(R-R)値  
Fig. 8. Comparison result of R-R value.

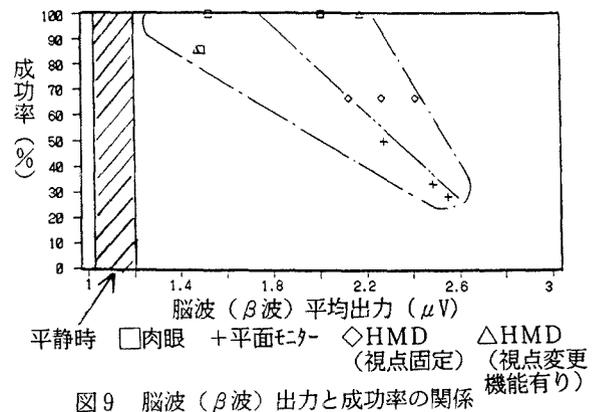


図9 脳波( $\beta$ 波)出力と成功率の関係  
Fig. 9. Relation between beta wave and achievement rate.

視と視点変更機能の有用性がわかる。

(2) ストレス評価～心拍と脳波測定結果

作業中の心拍 (R-R平均) 測定結果を図8に示す。

ストレスが加わると心拍R-R平均が下がることが知られており<sup>(2)</sup>が、各画像提示方式時の測定結果は平静時の変動の範囲内となっており、心拍R-R平均では検出不可能なほどのストレスレベルの差しかないと考えられる。

作業中の脳波 ( $\beta$ 波) 測定結果を図9、図10、図11に示す。

成功率と $\beta$ 波平均出力の関係を見ると、成功率が下がり、作業時間が増えると、すなわち作業性が悪くなるにしたがい $\beta$ 波平均出力が大きくなっており、作業の難易度と $\beta$ 波との関連性を示している。また、これは被験者の主観的評価によるストレス感の度合いと合致している。

各画像提示方式時の $\beta$ 波の測定結果は、平静時に比べ遠隔操作時はどの画像提示方式においても $\beta$ 波平均出力が増加しており、マスターアーム操作によるものと考えられる。また、 $\beta$ 波の出力から判断すると作業の難易度は肉眼とHMD～視点変更機能有りは同程度であり、次いでHMD～視点固定、平面モニターとなっている。

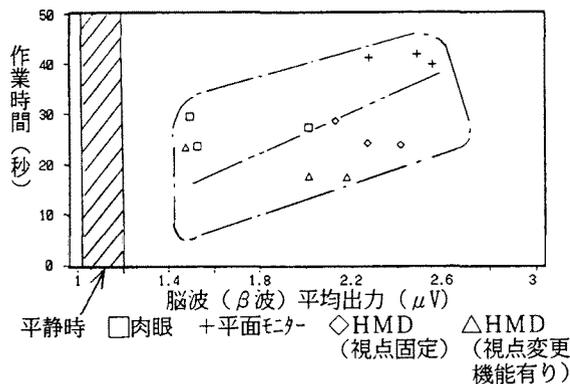


図10 脳波 ( $\beta$ 波) 出力と作業時間の関係

Fig.10. Relation between Beta wave and operation time.

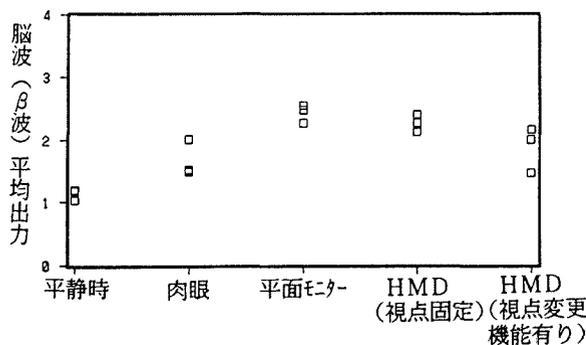


図11 画像提示方式による脳波 ( $\beta$ 波) 出力

Fig.11. Comparison result of beta wave.

5. 習熟度評価用遠隔操作実験

5-1 実験方法

次に、作業者の習熟度を評価するため以下のような実験を行った。

- (1)実験方法：初体験と5分間の練習後と10分間の練習後の場合での6個のターゲットへのロボットハンドの位置合わせ
- (2)実験装置：テレオペレーション実験装置
- (3)ターゲット：直径4.3mmのボールを左右400mm間隔×奥行3列300mm間隔で配置
- (4)被験者：テレオペレーション実験装置を初めて操作する者(4人)
- (5)比較条件：平面モニター(平面視)とHMD～視点変更機能有り(立体視の映像提示で立体カメラ架台の追従運動有り)で比較
- (6)測定項目：作業時間、成功率、心拍、脳波(心拍は竹井工業製心拍メモリ装置、脳波はランダムエレクトロニクスデザイン社製IBVAを用いて測定)

5-2 実験結果

(1)成功率と作業時間

成功率と作業時間の結果を図12、図13に示す。成功率はターゲット個数/試行回数とした。

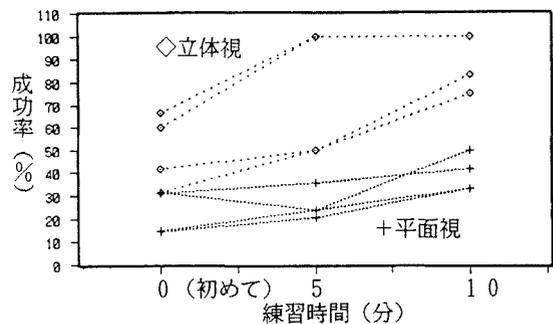


図12 初心者の習熟度(成功率)

Fig.12. Achievement rate of beginners.

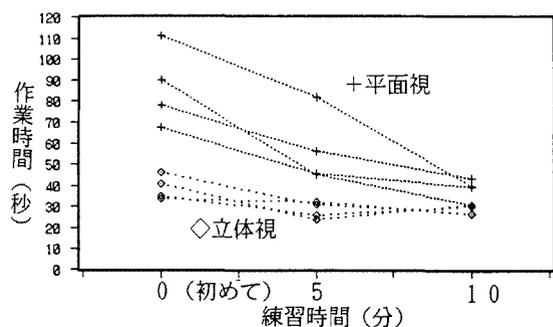


図13 初心者の習熟度(作業時間)

Fig.13. Operation time of beginners.

成功率で比較すると、初体験から立体視の方が平面視に比べ約2倍良好であり、また練習効果が高く、練習時間5～10分ではほぼ100%に達している。一方、平面視は初体験での成功率が10～30%と低く、練習効果は見られるがその効果は遅く、5～10分の練習では30～50%までしか向上しておらず、成功率100%までには練習不足の状態である。

作業時間の結果をみると、立体視では初体験時で40秒前後であるのに対し、平面視では60～120秒と劣位であり個人差が大きくなっている。また、練習効果でみると、5～10分の練習後には、立体視ではほぼ30秒前後で収束するのにに対し、平面視では訓練による作業性の向上が見られるものの立体視のレベルにまでは到達しない。

成功率、作業時間ともに、平面視での練習10分後と立体視での初体験が同程度となっており、練習がなくても、立体視の場合は作業性が高いことがわかる。また平面視の場合、作業時間は早くなるが成功率は上がらない結果となっており、練習と共にロボット操作等の作業には慣れるが正確なターゲットの位置把握は難しいためと考える。

(2) ストレス評価～心拍と脳波測定結果

作業中の心拍R-R平均値を図14に示す。

立体視による遠隔操作の場合、心拍R-R平均値は平静時に比べ初体験時に低下する。しかし、練習にしたい心拍R-R平均値が上昇し、練習10分後には平静時のレベ

ルにまで回復している。これは、最初は遠隔操作自体が初体験であるための緊張から心拍R-R平均値が大きく低下し、練習にしたい被験時間が長くなるとともに遠隔操作に慣れてくるためと考えられ、習熟度が高くなり成功率が100%程度までになると遠隔操作作業を行っていても平静時に近い心拍状態を保てることを示している。平面視による遠隔操作の場合も、心拍R-R平均値は平静時に比べ初体験時に低下する。練習にしたい徐々に心拍R-R平均値が上昇し回復基調ではあるが、10分の練習では平静時レベルまで回復しきれない場合がある。これは、10分の練習ではまだ作業が未熟なため緊張度が高いことが起因していると考えられる。

作業中の脳波の評価としてβ波の平均出力を図15に示す。

立体視による遠隔操作の場合は平静時に比較しβ波出力が大きくなっており、初回又は練習5分後のβ波出力が最大となって、練習を行うにしたいがって低下しているが、心拍R-R平均値と異なり平静時レベルにまで回復しきれない場合もある。平面視の場合にも平静時に比較しβ波出力が大きくなっており、練習にしたい回復基調のものが多いが、中には10分の練習にしたい大きくなっている場合も見られる。また、β波出力レベルとして立体視と平面視を比較すると有意差がみられないものがある。これらの理由は、現段階では、初めてHMDを装着する、初めてロボット操作をする等の作業の難易度とは違う要因がいくつかあり、各々を分離できないためであると考えられる。

6. 考察とまとめ

ロボット位置決め遠隔操作において、遠隔の視覚情報を入手する方法(画像提示方式)の違いによる作業性を実験し、平面モニターに比べHMD(立体視)、HMDでも視点変更機能のあるものが良好であった。また、HMD(視点変更機能有り)は肉眼と同程度の成功率で肉眼より短時間の作業を達成する場合があった。この結果より、遠隔操作において肉眼と同等の作業性を達成するためには、視覚情報を立体画像化するだけでなく、視点変更機能が必要であることがわかった。

また、遠隔操作における初心者の習熟効果を実験し、平面モニターの場合は10分の練習後でもHMD(視点変更機能有り)の初体験時に達する程度であるのに対し、HMD(視点変更機能有り)の場合は5～10分の練習で肉眼と同等と考えられる作業レベルにまで向上することがわかり、HMD(視点変更機能有り)は習熟が速いことがわかった。

作業の難易度を定量化する指標として心拍R-R平均値とβ波平均出力が適用できることがわかった。

またストレス評価指標としては、心拍R-R平均値で解析不可能な微小レベルのストレスをβ波の平均出力により定量化する可能性を見出し、今後、ストレス定量化のための指標として期待がもてる。しかし、いくつかのストレス

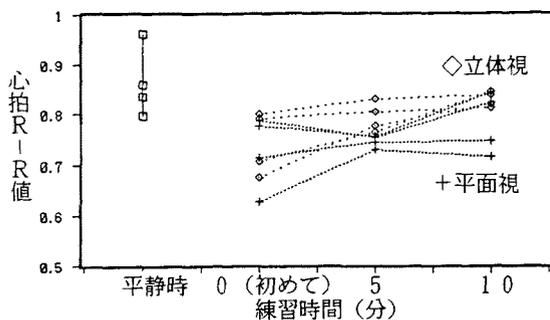


図14 初心者の習熟度(心拍(R-R)値)  
Fig. 14. R-R value of beginners.

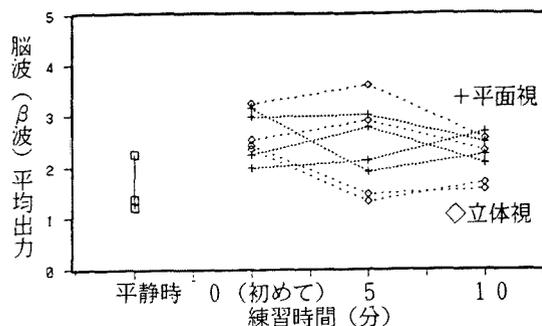


図15 初心者の習熟度(脳波(β波)出力)  
Fig. 15. Beta wave of beginners.

要因がある場合には、各要因毎に分離して解釈する必要がある。

(平成6年6月29日受付)

文 献

(1) 舘 暲・荒井裕彦：テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価、日本ロボット学会誌、Vol. 7. No. 4, PP50-62, 1989

(2) 大村裕子・葛岡英明・割沢伸一・光石 衛・広瀬通孝・石井威望：生産システムにおけるCSCWの人間工学的評価手法の提案、ヒューマンインターフェイスシンポジウム、第6回論文集、PP105-108, 1990

黒木 雅嗣 (非会員) 1965年1月19日生まれ。91年3月東京大学機械工学専攻修士修了。同年4月新日本製鐵(株)入社。主として設備エンジニアリング、テレオペレーション技術開発に従事。



嶋 哲男 (非会員) 1954年7月25日生まれ。80年3月東京工業大学機械物理工学専攻修士修了。同年4月新日本製鐵(株)入社。主として設備エンジニアリング、技術開発に従事。



大川 明宏 (非会員) 1958年2月3日生まれ。83年3月室蘭工業大学機械工学専攻修士修了。同年4月新日本製鐵(株)入社。主として設備エンジニアリング、技術開発に従事。



河野 治 (非会員) 1953年9月6日生まれ。78年3月東京大学産業機械工学専攻修士修了。同年4月新日本製鐵(株)入社。主として設備エンジニアリング、技術開発、保安全管理に従事。



舘 暲 (非会員) 1973年東京大学大学院工学系研究科博士過程修了、工学博士。同年東京大学助手。1975年通産省機械技術研究所研究員、その後主任研究官、バイオロボティクス課長。1979~80年マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年東京大学助教授。1992年東京大学教授、現在に至る。

