

テレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価

非会員 舘 障 (東大)
非会員 安田 賢一 (東大)

Design and Evaluation of Tele-Existence Manipulation System
Susumu Tachi, Non-Member and Kenichi Yasuda, Non-Member (University of Tokyo)

Tele-existence is an advanced type of tele-operation system which enables an operator at the control to perform remote manipulation tasks dexterously with the feeling that he or she exists inside an anthropomorphic robot as a virtual exoskeleton robot working in the remote environment. A tele-existence manipulation system was constructed and was evaluated quantitatively by comparing tasks of tracking a randomly moving target under several operational conditions. The effects of various characteristics, e.g., binocular vision and the effect of natural arrangement of the head and the arm, were analyzed by comparing quantitatively the results under these operational conditions. Human tracking transfer function was measured and was used for comparison. A manipulation task of block building was also conducted under several operational conditions including motion stereo. The time elapsed for the completion of the task was used as the criterion for the comparison. The results revealed the significant dominance of the binocular vision with natural arrangement of the head and the arm, which is the most important characteristic of tele-existence.

キーワード: テレイグジスタンス, 人工現実感, バーチャルリアリティ, 作業評価

1. まえがき

遠隔に存在するロボットを自分の分身のように高度の臨場感をもって制御する, いわゆるテレイグジスタンスの概念を提唱し⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, その工学的実現のための研究開発を進めている。テレイグジスタンスは, 米国ではテレプレゼンス⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 仮想環境⁽⁶⁾, 人工現実感⁽⁷⁾などとも呼ばれ 1989 年以降はバーチャルリアリティと総称されるに至った概念のエイリアスであり, ロボットの分野において我が国から生まれた。現在までに, 基本的な視覚の臨場的な提示法を提案し, その設計法を示すと共にホログラムを用いる評価法を確立するとともに⁽⁸⁾, 仮想環境へのテレイグジスタンスの基礎研究⁽⁹⁾, 力感覚の提示におけるインピーダンス制御法の研究⁽¹⁰⁾, 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計法の研究⁽¹¹⁾, 仮想環境と実環境の重ねあわせの方法⁽¹²⁾等の研究を重ねてきている。現在, マニピュレーション作業への適用のための研究を行っており, テレイグジスタンスを用いたマニピュレーションのための人間型スレーブロボットの試作結果を報告した⁽¹³⁾。

本論文においては, マニピュレーション作業のためのテレイグジスタンス・システムの設計法を具体的に示しテレイグジスタンスの効果を実験的かつ定量的に評価することを目的として, 作業用実験システムを構築している。また

その試作ハードウェア・システムを用いてテレイグジスタンスを用いるマニピュレーション作業の効果を定量的に評価している。

2. マニピュレーション作業用実験システム

マニピュレーション作業用実験システムは, 人間型スレーブロボットとその移動装置, テレイグジスタンス作業用マスタ装置, 及び作業対象とからなる。図 1 にテレイグジスタンス・システムの構成を示す。スレーブロボットは, 人間型のロボットで, 平面移動のための移動装置を有している。テレイグジスタンス作業用マスタシステムは, 操作者(オペレータ)がこれに乗込み, 遠隔のロボットとの通信路を確立することにより, オペレータは, その場にいながらにして, 遠隔で働くスレーブロボットと自分自身が一体化したような感覚を得ることができる。オペレータの手の運動や首の運動がエンコーダを用いた測定装置で実時間計測され, コンピュータと通信装置を介して, ロボットに送られる。平行リンク構造とユニバーサルジョイント構造によるカウンターバランス機構により, オペレータは頭部の運動を拘束されず, しかも装置の重量を意識せずに, 空間内 6 自由度の運動が自由に行なえるようになっている。

(2.1) 人間型スレーブロボット 大きさや自由度配置を人間に合わせて設計したテレイグジスタンス用スレー

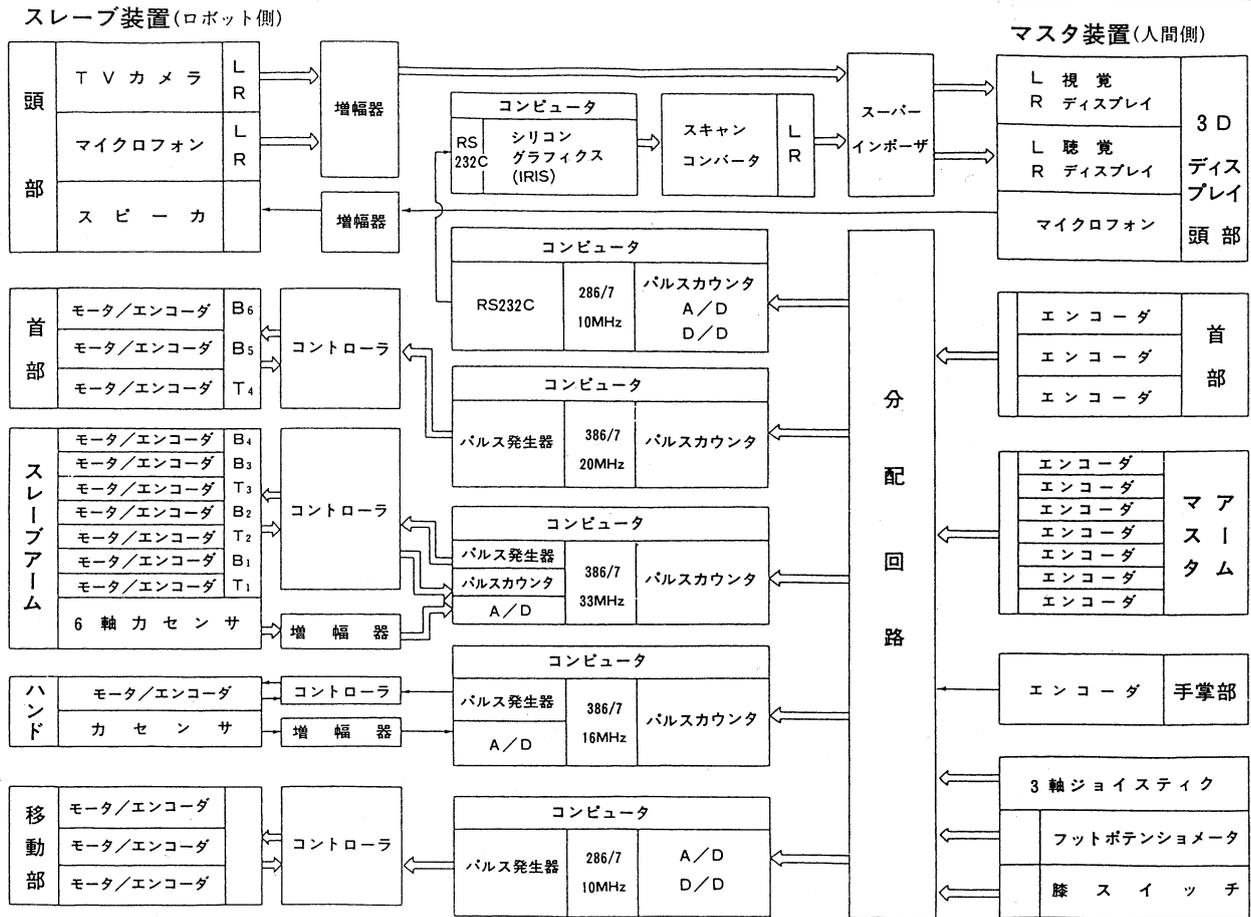


図1 テレイグジスタンス・マニピュレーション作業用システムの構成
 Fig. 1. Block diagram of the tele-existence manipulation system.

プロボットを 図2 に示す。この人間型スレーブロボットは、7自由度の右腕（アーム）、1自由度のハンド、3自由度の首機構、1自由度の腰部と合計12自由度を有し、形状や動作範囲を人間に可能なかぎり近づけている。頭部には立体視カメラとマイクロフォンを搭載し、オペレータの運動計測情報に従って実効上時間遅れなくオペレータと同一の方向に制御される。このロボットは、移動機構により平面内の2自由度の並進と1自由度の回転が可能である。ロボットの得た視聴覚情報は、オペレータに送られ、オペレータは頭部に結合された提示装置を使って、ロボットが見たり聞いたりしたのと原理的に同一の歪のない空間を、フルカラーかつ三次元で体験できる。オペレータが作業を行うと、人間と同一の自由度配置に設計された7自由度のスレーブアーム機構が、その動作を忠実に再現する。オペレータは、自分の腕の存在する場所にロボットのアームを見て、視聴覚情報と姿勢・運動感覚情報が整合した状態で作業を行える。

(1) スレーブアーム 人間型ロボットのスレーブアームの肩部は、胴体側から前後 (B4)、左右 (B3)、回内外 (T3) で、それらの回転軸は一点で変わる。肘は、屈曲 (B2) と回転 (T2)、手首部も屈曲 (B1) と回転 (T1) からなっている。首は、3軸のジンバルで、首のかしげ (B6) とチルト (B5) のあとにパン (T4) が配置され、それぞれの回転軸は1点で変わる。先端の位置決め精度は $\pm 1\text{mm}$ 、可搬重量は 1kg、

先端最大速度 3m/sec で動作可能である⁽¹³⁾。

図3にスレーブハンドを示す。スレーブハンドは1自由度の挟み動作を行う。一般に1自由度の挟み動作では、物体の2方向からの支持となり大きな物体の把握時には不安定となりやすいが、ボールネジと平行リンクの組合せにより物体の支持が3点できるため安定な握りが可能な構造に設計している。ハンドの最大開き幅は 124mm、把握力は平均 5kg で、指部材には把握力計測のために歪ゲージを貼付してあり、この情報を用いて力制御が可能である。開き幅の計測はモータ軸端のエンコーダにより行っており、平均分解能 $10\mu\text{m}$ の位置制御が可能である。また、アームとハンドの間に6軸の力トルクセンサ（力分解能 3g）を配しており、このセンサからの力・トルク情報を利用してメカニカルインピーダンスの制御を行うことができる。なお、スレーブアームの位置精度と可搬重量を低下させないよう、極力軽量化を行っている。リンク部材はジュラルミン製で、力センサを含めたハンド総重量は 620g である。

(2) 視聴覚入力部 42万素子のカラー CCD を用いたビデオカメラのヘッド部を2台用いて視覚入力部を構成している。レンズ系は焦点距離が $f = 12 \sim 72\text{mm}$ でレンズの明るさが F1.6 のズーム系であり、それを提示系との関係から 40度の視野となるように $f = 15\text{mm}$ で利用している。焦点は TTL 方式のオートフォーカスで調節している。2台

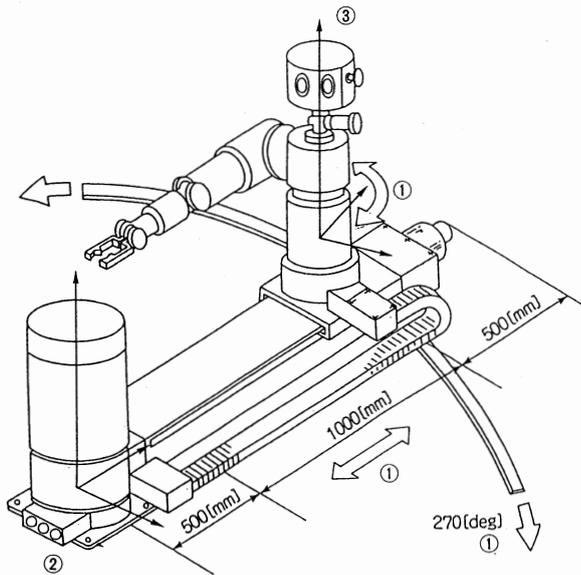


図4 移動機構

Fig. 4. Locomotion mechanism.

も平均的な人間の位置関係にあわせて配置してある。

(3) 移動機構 図4にスレープロボットの移動装置の構成と可動範囲を示す。マスタ装置に配したジョイスティックによるスレーブの移動には次のような三種類のモードが可能である。

- (1) ジョイント座標系動作：ジョイスティックの3軸に対して、3軸それぞれ独立に動作する、
- (2) ワールド座標系動作：3軸が協調してワールド座標系で直交動作する、
- (3) ボディ座標系動作：3軸が協調してロボットのボディに固定された座標系で直交動作する。

これらは制御を司るCPU (286+287 10MHz) によって選択される。また、ティーチングプレイバックを行うことができ、“MOVJ” (ジョイント動作) や“MOVL” (直交動作) などの簡単なロボット言語によって所望の軌道復元をすることもできる (ただし本実験ではプレイバック機能は利用していない)。

(2・2) テレイグジスタンスマスタ装置 マスタ装置の構成を図5に示す。マスタ装置はオペレータにロボットからの臨場的な3次元視聴覚情報を提示するための視聴覚情報提示部、視聴覚提示部の重量を支えつつ拘束することなくオペレータの頭部運動を計測することのできる頭部運動計測部、オペレータの右腕の運動を計測するマスタアーム部、3軸のジョイスティック等その他の機能部から構成されている。

(1) 視聴覚情報提示部 基本的に、著者らが提案した視覚情報提示系の設計法⁽⁸⁾に基づき設計されている。作業用の視聴覚情報提示部であることを考慮して画像の分解能を重視して設計している。表示部としては6インチの液晶ディスプレイ (以下LCDと略す) 利用し、周辺回路をカウンタバランスとして用いるように配置に工夫をこらした。

手による補助なしでも素早い動きが可能のように頭部への固定法として密着度の高いフルフェイスのヘルメットを用いている。着脱機構によりヘルメットを交換することでサイズの変化にも対応できる。総重量は5.5kg (内ヘルメット1.4kg) であり、提示部の構成を工夫して慣性モーメントを小さく押さえている。LCDにはRGB信号入力用の6インチ (H720×V240ピクセル) の素子を用いた。また、2枚のミラーによって光路を立体的に構成することによりLCDの提示面を図6において紙面と平行になるように配置し、コンパクトな光学系となるよう工夫している。これによって作業時にオペレータの手が自由に運動できるために必要となる顔前方の空間が確保されている。

接眼レンズはLCD上の映像の虚像提示距離が1mになるように設定し水晶体の調節による影響を最小限にしている。また不用な鏡像は偏光板によって視界から除去した。2枚のLCDの等価的な中心間距離は65mm、視野角は単眼40度で視野角の足りない部分は首の自由な動きで補う。解像度は実測で1,000mm地点で1mm (視力換算で0.3) を得ており、スレープロボットの手先の位置決め精度を上まわっている。なお、LCDおよびレンズの曇り防止のために送風ファンを内蔵しており、これにより長時間の連続着用を行っても視界が悪化することなく作業が可能となる。

詳しくは文献⁽¹¹⁾を参照されたい。

(2) 頭部運動計測部 オペレータの頭部の空間内における並進3自由度、回転3自由度の運動を非拘束かつ実時間で計測しつつ、提示装置の重量を支持して、オペレータの運動に従い、常にオペレータの前方に三次元の視野を確保するための機構が必要である。本方式は、平行リンクを用いたアクチュエータを内蔵しないセンサのみを有するパッシブ型であり、計測後のデータの実時間処理を容易にするため、機構そのものを並進3軸と回転3軸とが干渉しないようなメカニズムとして設計した。また、慣性についてはパッシブ方式のため除去できないが、可能な限り小さくし、かつ、並進3方向の大きさアンバランスができるだけ少なくなるように工夫している。オペレータによる頭部の運動は、リンクに取り付けられた六つのエンコーダによって計測され、姿勢3軸と並進3軸を相互の干渉を排除した状態で測定することが可能である。

このリンク機構の全体の重心は、P点に固定され、どのような姿勢をとっても変化しないように設計されている。

それに加えて、AA'の方向が、A点の運動に対して変化せず一定となるように別の平行リンクAA'-BB'と、BP-QRを付加してある。

上記の考案は、紙面に含まれる正中面内での垂直の運動に対してであるが、紙面に対して垂直な方向の額面内での水平の運動については、3本の平行リンクとユニバーサルジョイントにより実現する。すなわち、水平の運動と垂直の運動とをユニバーサルジョイントで分離し、垂直の運動は前記のリンク構造で、水平の運動に対しては上部の2本の平行リンクで実現している。回転運動については、ジン

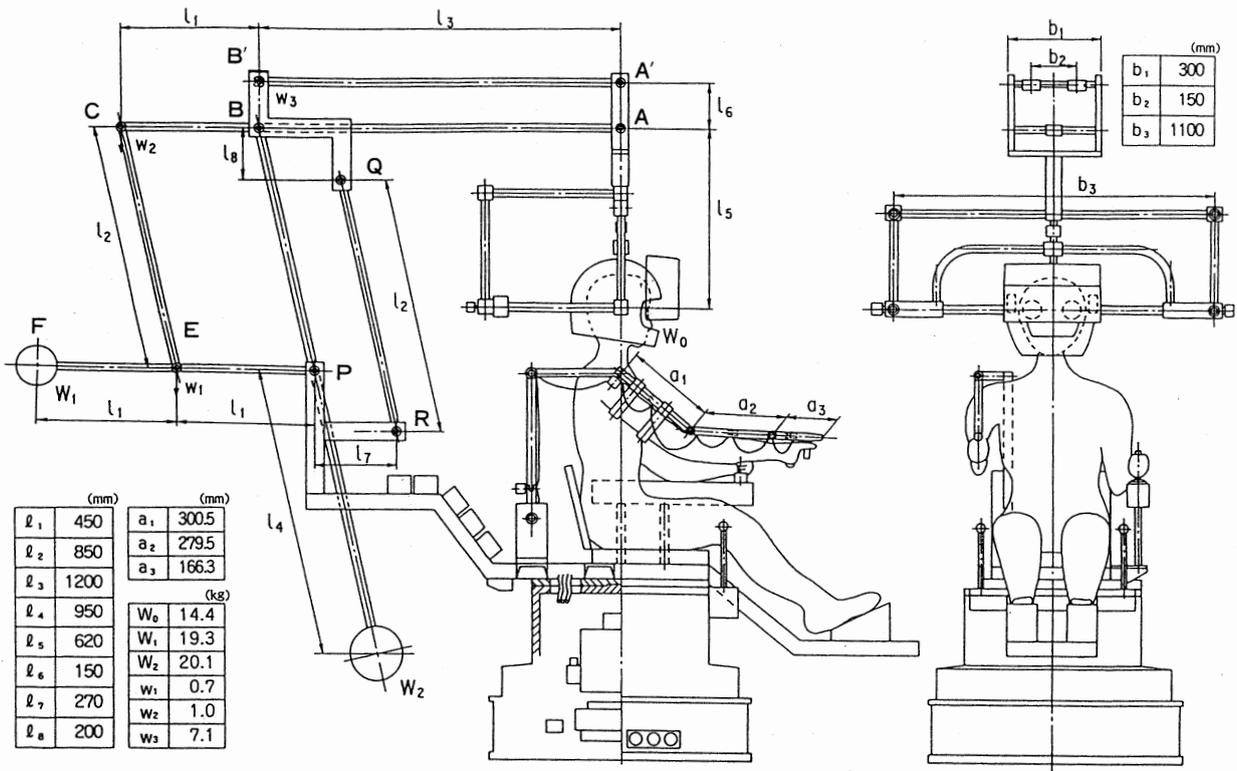


図5 マスタ装置の機構図
Fig. 5. Tele-existence master system.

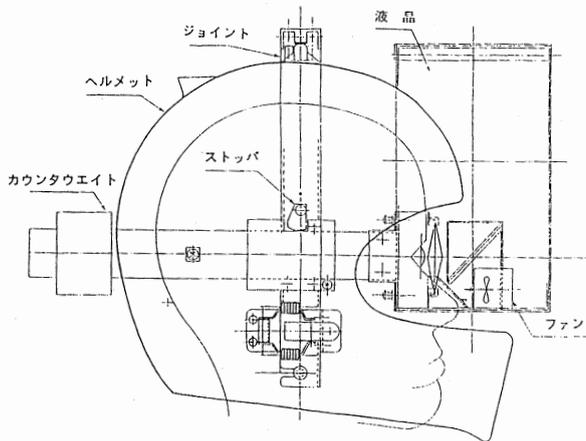


図6 頭部搭載型視聴覚情報ディスプレイ
Fig. 6. Head mounted display (HMD).

バル構造を用いている。どのような姿勢でも最も重要なパンの方向の回転が、その姿勢の座標系に対して行えるような自由度配置を工夫している。首のかしげの方向の運動のため別の平行リンクを用いている。なお、提示部ジンバル構造の後に設けたリンク構造は、ジンバルを支えるためのリンクであり、重力は支えるが運動は全く拘束しない。動作範囲はX軸方向1,100mm, Y軸方向600mm, Z軸方向900mmである。

(3) マスタアーム スレーブアームと同様に人間と形状と自由度配置を類似させたマスタアームを構成している。自由度は7自由度で冗長自由度を有する。各関節には

72,000 pulse/revolutionの高分解能エンコーダを用いている。このマスタアームはスレーブアームと同構造かつ同形で、マスタアーム先端のハンド部を握り、肩と前腕部を密着させるようにして操作することにより、オペレータの腕の7自由度の運動を拘束感なく実時間で計測することができる。また、本装置はこの7自由度にさらに3自由度を加え、人間の体幹の移動に対して追従し得るように構成しているが、この追加3自由度は本論文の実験では固定し利用していない。なお、マスタアームには、スレーブハンド開閉用のポテンシオメータと補助スイッチが取り付けられている。

(4) その他の機能 右手でスレーブアームを操作するほかに、移動用テレイグジスタンス操縦や機能拡張のための3軸のジョイスティックが左手で使用できるようになっている。左右の両足には、それぞれフットポテンシオメータが配されている。腰部の回転に対応したアクチュエータが椅子の下に組込まれており、左右の膝ポテンシオメータで指示され、マスタ機構全体が回転する。ただし、フットポテンシオメータと膝ポテンシオメータは本論文の実験では用いていない。

(2-3) 制御システム 図1に示したようにオペレータの運動や状態がエンコーダ、力・トルクセンサ、ポテンシオメータ等で計測され、5台のパーソナルコンピュータに配したアップダウン・カウンタやA/D変換ボード、D/Dボードを介して取り込まれる。コンピュータではマスタ・スレーブ機構のモデルに基づいて計算により人間の頭部運動、上肢運動、ハンドの開閉などの状態が推定される。これら

の情報がコントローラに送られロボットが制御される。5台のパーソナルコンピュータの内の1台は仮想環境構成用のワークステーションにオペレータの運動情報を送るために利用されるが⁽¹²⁾、本実験ではこの機能は利用していない。

本システムはオペレータの運動情報に基づいてすべてのサブシステムが制御される方式になっており、従って運動指令によりコンピュータ間の同期が自然にかかる仕組みになっている。スレーブアームの制御は、位置指令に基づくインピーダンス制御を基本としている⁽¹⁰⁾。インピーダンス制御の詳細は文献⁽¹⁰⁾を参照されたい。なお、プログラムはC言語で書かれており、プログラムサイズは頭部制御、上肢制御、ハンド制御、移動制御それぞれ 11,572, 76,983, 22,611, 86,375 バイトであり、インピーダンス制御時でも 3ms 以下のサイクルタイムを実現している。

3. 作業実験

トレイグジスタンスの最も特徴的な点は、人間が仮想存在する仮想環境が(1)人間にとって自然な3次元空間を構成しており(臨場感)、(2)人間がそのなかで自由に行動でき、その仮想環境との相互作用が自然な形で実時間に生じ(実時間相互作用性)、かつ(3)自分の分身がその環境にいる事(自己投射性)である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。(1)については、理想的には、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚のいわゆる五感と呼ばれる外界情報と、体性感覚などの内界情報が整合性を保った形で人間に提供されなければならない。これは、ロボットを用いるトレイグジスタンスは、ロボットが人間の動きに従って外界から得た情報を人間の身体形状や身体の運動状態と矛盾しない形で忠実に再現することにあたる。(2)は、ロボットが自由に環境内を行動できることであり、(3)は、自己の分身の存在であり、自分がその分身に投射された感覚を意味する。ロボットを用いる人工現実感では、人間型のロボットにより自分自身を遠隔環境に投影する。例えば、自分の手のあるところに、ロボットの手がみえ、自分がロボットになりきった、ないしは、ロボットのなかに入り込んだ感覚を生じさせる。

臨場感と自己投射性の違いは、つぎのように説明できよう。自己投射性のあるシステムでは、自分の周りのすべてを実環境でなく仮想環境にかえられる。すなわち、まわりの環境のみでなく、自分自身もが、仮想環境内の自分となる。従って、そこで見える自分の手は実際の自分の手があるべき位置に見えるロボットの手であり、仮想の手である。それらが、ロボットの眼をかりて観察される。

従来のテレオペレーションは、実時間相互作用性を有し、臨場感もある程度在るが、自己投射性に欠ける。これに、自己投射性を加えたシステムがトレイグジスタンスによるロボット制御システムであるといえよう。

従って、トレイグジスタンス・マスタ・スレーブ作業システムの主な特徴は、以下の2項目にまとめられる。

- (1) 首の動きに連動した広視野で自然な3次元視聴覚が得られる。

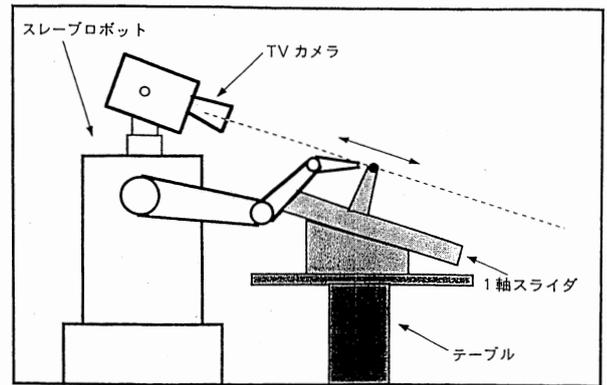


図7 追従実験の概観

Fig. 7. Experimental arrangement of tracking experiment.

- (2) 視覚と体性感覚(固有受容感覚)の対応が自然である。すなわち、常にオペレータの腕のあるところに対応してロボットの腕が視野内に見える状態で作業ができる。

上記の二つの特徴の効果を定量化するために基本的には、

- a) トレイグジスタンスマスタスレーブ作業システムによる実験、
- b) 上記の視覚情報提示を両眼立体視とせず、人間の両眼にカメラからの単眼情報を与えた場合の実験、
- c) 従来の遠隔操作のように、首の位置とは別の場所に固定した広角カメラで映像をとりそれをモニタテレビで見ながらの作業実験、

の3種類を以下に示す2種類の定量的な評価実験を行うことにより比較した。

ただし、聴覚情報については本論文の実験では用いていない。

(3-1) 追従特性による評価実験

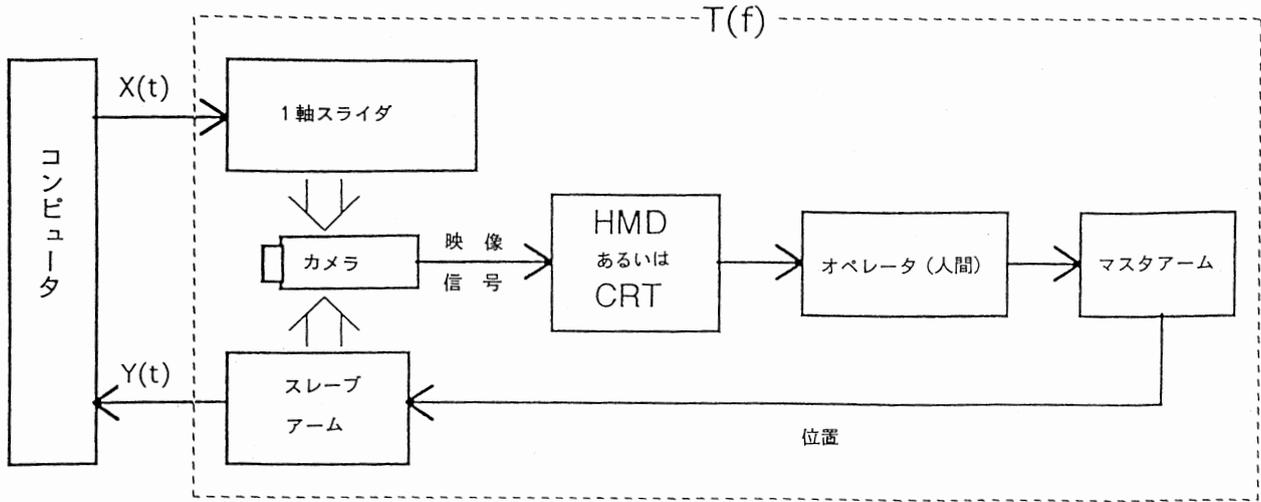
図7に実験の概観を示し、図8に実験システムのブロック図を示す。目標位置入力装置には1軸のスライダ(ストローク 200mm)を用い、これをロボットが向いている方向に対して、認識するのが最も不利だと思われる奥行方向に設置する。そして、オペレータがマスターアームを操作することでスレーブロボットの先端を制御し、1軸スライダに取り付けられた指標に追従する。

1軸スライダへの目標位置入力 $x(t)$ には疑似ランダム信号、

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_0 p^{-k} \sin(2\pi f_0 p^k t + \phi_k) \dots \dots \dots (1)$$

($p = 1.25, n = 17, f_0 = 0.0326 \text{ Hz}, \phi_k$ は乱数)を用いる。なお $a_0 p^{-k}$ により高周波ほど振幅を減少させ、 ϕ_k を用いて各周波数成分が互いに独立となるように工夫している。さて、オペレータは種々の提示装置を介してスライダの指標を観測し、マスターアームによりスレーブロボットアームを制御し、スレーブハンドの先端が指標に追従するように追従制御を行う。その際のマスターアームの運動軌跡からスライダ方向の成分 $y(t)$ を実時間で求める。

また、マスタースレーブ、及び、1軸スライダの制御周期



(サンプリング間隔 : 30ms, 1024点)

図 8 追従システムのブロック図

Fig. 8. Block diagram of the tracking system.

は 10 msec, 位置データのサンプリング周期は 30 msec である。ここで, 1,024 点のサンプリング結果をフーリエ変換し, 入力信号のパワースペクトルと入出力間のクロススペクトルの比を求めることによって, オペレータを含んだシステムのシステム関数 $T(f)$ が推定される。

ここで評価すべき, オペレータを含んだ提示・操作系のシステム関数 $T(f)$ は

$$\begin{aligned}
 T(f) &= \frac{\Phi_{xy}}{\Phi_{xx}} \\
 &= E[X(f) \{Y(f) + N(f)\}] / E[X(f) X(f)] \\
 &= E[X(f) Y(f)] / E[X(f) X(f)] \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

で与えられる。ただし*は複素共役, $E[]$ はアンサンブル平均を意味する。

$x(t)n(t)$ を信号と独立な正規の観測雑音として, プログラム上では $x(t), y(t) + n(t)$ の 1,024 点のサンプリング結果の Fourier 変換をそれぞれ $X(f), Y(f) + N(f)$ とし, これのアンサンブル平均から相互スペクトル Φ_{xy} , 自己スペクトル Φ_{xx} を求める。

前述の実験を視覚提示系を以下の 5 種類として 5 名 (全員 30 才台の男性) を被験者として行った。

- [1] 直接視: スレーブアームは用いず直接にターゲットを観察しマスターアームで直接追従させる;
- [2] HMD(B): 頭部搭載型提示装置 (以下 HMD と略す) を用いた両眼立体視提示; ロボット搭載の立体視カメラ; カメラのピッチ, ロール, ヨーの 3 方向はオペレータの頭部運動に実時間に連動;
- [3] HMD(M): HMD 用いた単眼視提示; ロボット搭載のカメラの一つを利用; カメラのピッチ, ロール, ヨーの 3 方向はオペレータの頭部運動に実時間に連動;
- [4] CRT(H): CRT を用いた単眼視提示 (オペレータの正面に視野角 45 度で提示); ロボット搭載のカメラの一つを利用; カメラは固定;

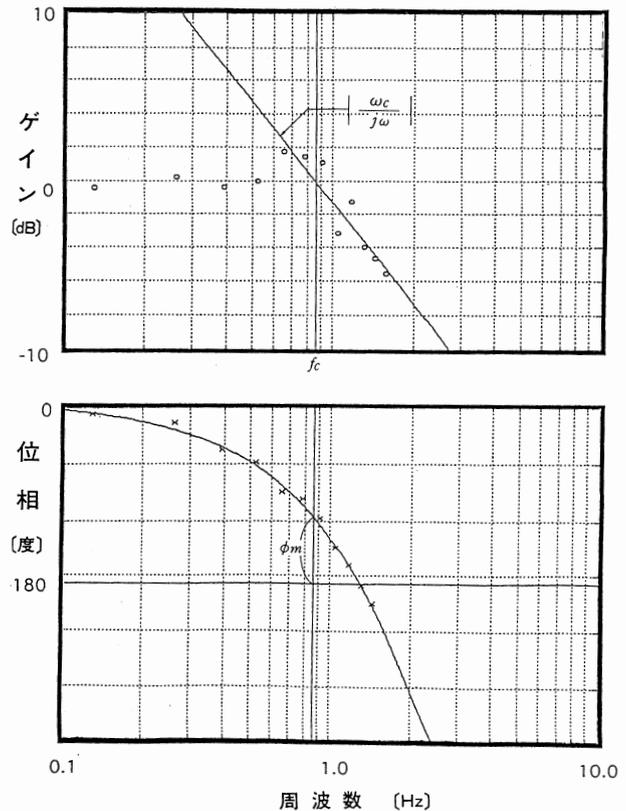


図 9 システム関数の一例

Fig. 9. An example of the system function measured.

- [5] CRT(O): CRT を用いた単眼視提示 (オペレータの正面に視野角 45 度で提示); ロボットとは別の位置に設置されたカメラを利用; カメラは固定;
- ただし, [3], [4] の場合は HMD や CRT にロボット頭部のカメラの右眼像だけを提示する。CRT は 25 インチの TV モニタを使用した。

この実験によって得られたシステム関数 $T(f)$ の例を図

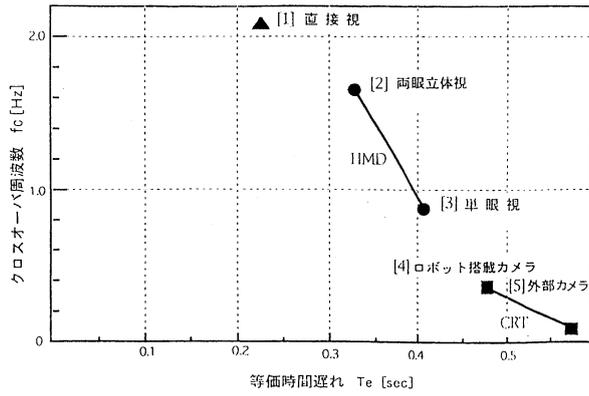


図 10 比較結果

Fig. 10. Comparison result.

9 に示す。追従作業時の人間のシステム関数の振幅（利得）と位相は周波数の関数となっており，第一次近似としてクロスオーバーモデルがあてはまることが知られている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。クロスオーバーモデルによれば，システム関数 $T(f)$ はクロスオーバー周波数 f_c の付近では次式により記述される。

$$T(f) = (\omega_c / j\omega) \exp\{-j\omega T_e\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで， K_e は実験に利用した提示装置を用いた時のオペレータの等価利得であり， T_e は反応時間と神経系と筋肉系に由来する等価時間遅れであり，次式で示される。

$$K_e = \omega_c = 2\pi f_c \dots\dots\dots (4)$$

$$T_e = 1 / K_e(\pi - \phi_m \cdot \pi / 180) \dots\dots\dots (5)$$

ただし， P_c をクロスオーバー周波数 f_c における位相として位相余裕 ϕ_m を $\phi_m = 180 - P_c$ として測定する。

このようにして，種々の提示装置を用いたオペレータの追従特性は，提示装置の良さにより定まり，それは等価利得の上昇，等価時間遅れの減少として定量的に現れる⁽¹⁶⁾。

図 10 に横軸に T_e ，縦軸に f_c をとって各種提示装置を比較している。横軸は原点に近いほど，縦軸は原点から遠いほど，すなわち左上ほど性能が良いことにあたる。図中の [1] は直接視の場合であり最高の状態を示している。[2] と [3] の差は両眼立体視の効果を示している。両眼立体視の方が追従誤差が小さく，周波数特性も良いことがわかる。この追従実験のように奥行方向の知覚を必要とする場合は単眼視は不利であることがいえる。[3] と [4] の差は HMD の場合と CRT の場合でこの場合ともに単眼視ではあるが，HMD ではオペレータの首の動きに連動して画像が提示されるので，単眼視でもある程度運動視差によって奥行知覚が生じるための効果であると考えられる。[4] と [5] の差は視覚と腕の自然な対応の効果を示しており，ロボット頭部のカメラでの実験の方が優れていることがわかる。

テレイグジスタンスの大きな特徴の一つとして自分の腕の見えるべき位置にスレーブロボットの腕が見える状態で作業が行えなければならない，これによって人間の感覚機能と運動機能の統合能力がロボットに反映されスムーズな作

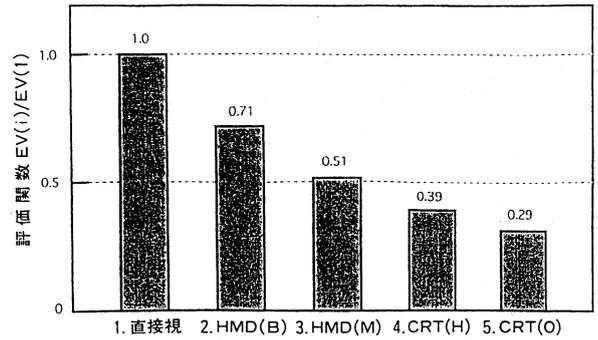


図 11 比較結果

Fig. 11. Comparison result using the EV criterion.

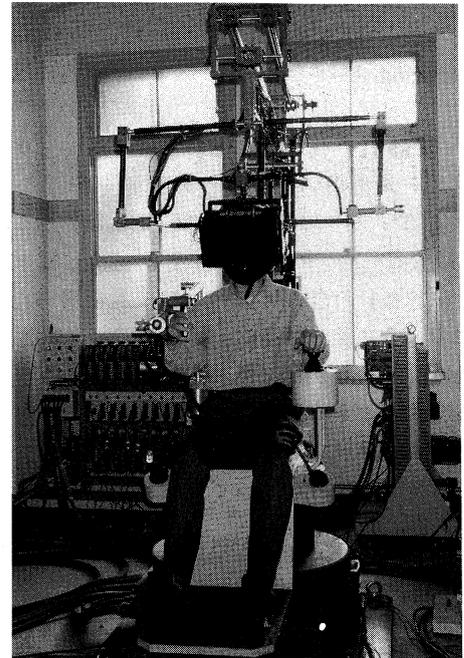


図 12 実験風景（マスク装置）

Fig. 12. General view of the tele-existence master system.

業が可能となる。この結果はこのことを顕著に表している。

この結果はすべての被験者に対して傾向としては同一であるが， T_e や f_c の絶対値は被験者によって異なる。そこで次式に示す指標を用いて平均化を試みた。

$$EV(i) = K_e(i) + 1/T_e(i) \dots\dots\dots (6)$$

ただし， i は提示条件の番号である。

図 11 に $EV(1)$ で規格化した 5 名の平均データを示す。図 10 で表われていた提示装置間の差異が顕著に定量化されて見られる。

因みに，テレイグジスタンス方式 [2] によっても直接視 [1] には及ばないが，これは，[1] ではスレーブアームを用いていないため，そのダイナミクスによる遅れや利得の低下がないことの影響と，直接視とテレイグジスタンス視の視覚システムとしての優劣による影響が複合して現れているためと思われる。この二つの影響の分離は今後の課題である。

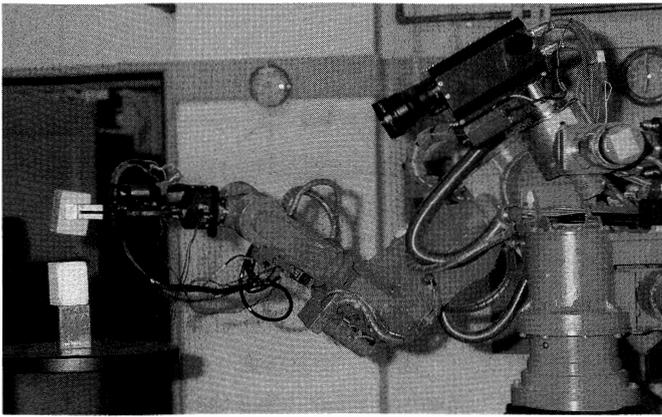


図 13 実験風景 (スレーブロボット)

Fig. 13. General view of the tele-existence slave robot under operation.

〈3-2〉 実験 II 作業による評価 テレイグジスタンス視覚システムを用いた作業性の評価を行うため、図 12 に示す前述のマスタ装置を用い図 13 に示すような対象物の操作実験を行った。対象物は、高さ 62mm 幅 43mm 厚さ 43mm で重さ 65g の直方体の三つの積木を用いた。この積木を図 13 のようにテーブルの上にランダムに配置しておき、ランダムに設定した初期位置からアームがテーブルにとどく位置までロボットをジョイスティックで移動させ、それからテーブル上の三つの積木を積み重ねる作業を行う。この時、移動開始の合図から積木を積み重ね終わるまでの時間を計測する。

この実験ではロボットに上半身運動追従機能を付与し、運動視の効果も合せ評価した。この機能はロボットの移動部の持つ並進 3 軸のうち、X 軸、Y 軸の 2 軸を使用して椅子に腰掛けたオペレータの頭部の平面並進運動を捉えることによってスレーブをその運動に追従させようとするものである。のぞき込みなどの効果によって視野領域が広がると共に、オペレータの左右の揺動によって運動視の効果が上がリ、奥行知覚の効率が向上されることが期待される。

比較方法として、両眼視と単眼視を大きな分類とし、そのそれぞれの場合に、上半身追従機能を付加するかしないかで分類した。また、単眼視の場合は、HMD だけでなく CRT モニタについても実験を行った。CRT は 25 インチの TV モニタを使用し、オペレータの目の高さとその中心をあわせ、さらに HMD の視野角が 40° であることから CRT の視野角も 40° 以上になるように目の位置から画像までの距離を決定した。この場合もまたスレーブロボットの右目像だけを提示する。但し、CRT の場合、当然ながら HMD を装着しないで作業を行うので、上半身運動追従機能は付加せず、また、オペレータの頭部の運動は無視される。従って実際には、スレーブロボットの首を、テーブルに対して前後の移動を行っても対象物が視野からはずれないように角度 (45°) に固定して作業を行った。

以上まとめると次のような五つの条件で比較することになる。

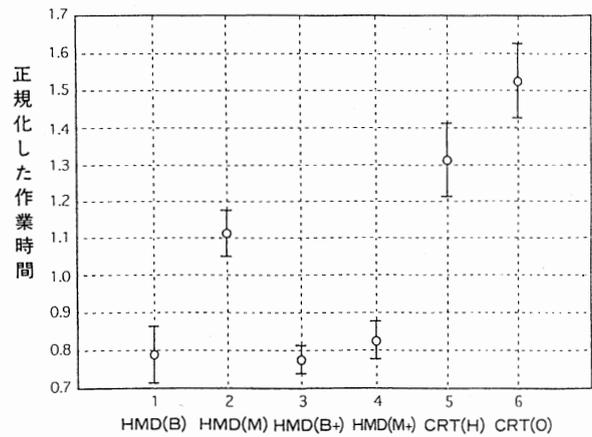


図 14 比較結果

Fig. 14. Comparison result using task completion time.

- (1) CRT(O) : CRT と外部カメラ
- (2) CRT(H) : CRT とロボット搭載カメラの単眼
- (3) HMD による単眼視 : HMD(M) と頭部運動連動のロボット搭載カメラの単眼
- (4) HMD による両眼視 : HMD(B) と頭部運動連動のロボット搭載カメラの両眼
- (5) HMD による単眼視で上半身運動追従機能を付加 : HMD(M+)
- (6) HMD による両眼視で上半身運動追従機能を付加 : HMD(B+)

この条件下での実験をそれぞれ 8 回ずつ行い、1 回につき (1) → (2) → (3) → (4) → (5) → (6) の順番で同じ初期位置から作業を行う。習熟による影響はないものと見なせる時点で実験を打ち切った。実験は 20 代半ばの男子 4 名について行った。

実験では同じ条件でも初期位置によって作業を行うのに 1~2 秒の差がある。従って、次の式でデータを正規化することで初期位置によるデータのばらつきを取り除いた。

$$N_{ij} = \frac{6 \cdot T_{ij}}{\sum_{j=1}^6 T_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 T_{ij} は i 回目の条件 j の作業の所要時間、 N_{ij} は正規化したデータである。この N_{ij} の 4 名の平均と標準偏差を図 14 に示している。この結果、実験 1 でみられた両眼視の効果 [HMD(B) と HMD(M) の差]、自然な目と手の位置関係の効果 [CRT(H) と CRT(O) の差] 及び頭部運動追従の効果 [HMD(H) と CRT(H) の差] が実験 2 における実際の作業においてもはっきりと認められる。すなわち、危険率 5% で t 検定を行った結果、HMD(B) と HMD(M); CRT(H) と CRT(O); HMD(M) と CRT(H) のそれぞれについて有意差が認められた。

実験 2 の作業実験において追加した上半身運動追従の効果は両眼視では顕著ではなかったが、単眼視においては極めて顕著にあらわれており追従する方が 1.4 倍ほど優れている (危険率 1% の t 検定で有意差が認められた)。これは単眼のみでは奥行感覚はなく対象物の大きさのみが距離の

手がかりとなるが、オペレータの上半身の運動にロボットが追従することにより横移動による運動視の効果が現れ、単眼でも両眼で行っているのと同等の奥行き知覚を生じるためと考えられる。一方、両眼視の状態で上半身運動追従の効果が現れなかったということは、本システムのHMDによる両眼視で作業に必要な奥行き知覚がほぼ得られていると言える。しかし、この場合でも、この柔軟な運動機能を効果的に使用することにより一層の効率的な作業を行うことができることが期待できることは言うまでもない。

4. むすび

スレーブロボットをいわばバーチャルな外骨格型人力増幅機として遠隔から制御するテレグジスタンス・ロボット制御の具体的な設計法をテレグジスタンス・マニピュレーション・システムを設計試作することで具体的に示し、その効果を追従実験と作業実験を介して定量的に評価した。

テレグジスタンスの最大の特徴は、ロボット自体も含む対象物や環境の情報を直接その場でロボットの視座からみたのと同等の物体や環境の大きさや距離感を有する空間情報として遠隔のオペレータに伝達すること（正確な臨場の空間再現）と、オペレータの体性感覚と視聴覚情報が矛盾なく再現され、あたかもロボットのなかに入り込んだような自己と環境の位置関係が実現すること（自己投射性）である。

これらの効果を試作したテレグジスタンス・システムをもちいた追従実験と作業実験を行うことにより、自然な両眼立体視の効果、頭部運動追従の効果、上体運動追従の効果、自然な目と手の位置配置の効果として分析しつつ定量的に調べ、テレグジスタンス方式の優位性を定量的に評価した。

(平成6年7月5日受付)

文 献

- (1) 舘 暉, 阿部 稔: 「テレグジスタンスの研究 第1報—視覚ディスプレイの設計—」, 第21回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 167~168 (昭57-7)
- (2) S.Tachi et al.: "Tele-existence (I) —Design and evaluation of a visual display with sensation of presence—", Proc. of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy 84), 245~254, CISM-IFToMM, Udine, Italy (1984-6)
- (3) 舘 暉, 谷江和雄, 小森谷清: 「感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方式」, 特許第1458263号, 出願1981年1月14日
- (4) D.L.Akin, M.L.Minsky et al.: "Space application of automation: Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)—PhaseII", NASA Contract Report, 3734 (1983)
- (5) J.D.Hightower, E.H.Spain et al.: "Tele-presence: A hybrid approach to high-performance robots", Proceedings of the '87 International Conference on Advanced Robotics (ICAR),

- 563~573, Versailles, France (1987-10)
- (6) S.S.Fisher et al.: "Virtual environment display systems", ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, 1~11, Chapel Hill, North Carolina (1986)
- (7) 廣瀬通孝ほか: 「人工現実感を利用した三次元空間内作業用マンマシーンインターフェース」, ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, 201~206 (昭63)
- (8) 舘 暉, 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, 7, 1, 314~326 (平1-8)
- (9) 舘 暉, 前田太郎: 「人工現実感を有するテレグジスタンスロボットシュミレータ」, 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II, 2, 179~189 (平4-2)
- (10) 井上康之, 舘 暉, 荒井裕彦: 「マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方法」, 日本ロボット学会誌, 10, 4, 490~500 (平4-8)
- (11) 前田太郎, 荒井裕彦, 舘 暉: 「頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価」, 日本ロボット学会誌, 10, 5, 655~665 (平4-5)
- (12) 大山英明, 常本直貴, 舘 暉, 井上康之: 「仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法」, 日本ロボット学会誌, 12, 2, 272~281 (平6-3)
- (13) S.Tachi, H.Arai and T.Maeda: "Development of anthropomorphic tele-existence slave robot", Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, 385~390, Tokyo, Japan (1989)
- (14) D.T.McRuer and H.R.Jex: "A review of quasi-linear pilot models", IEEE Transactions on Human Factors Engineering, HFE-8, 241~249 (1967)
- (15) T.B.Sheridan and W.R.Ferrell: "Man-machine systems", MIT Press, Cambridge, MA (1974)
- (16) S.Tachi, R.W.Mann and D.Rowell: "Quantitative comparison of alternative sensory displays for mobility aids for the blind", IEEE Transactions on Biomedical engineering, BME-30, 9, 571~577 (1984)

舘 暉



1946年1月1日生まれ。1968年、東京大学工学部計数工学科卒業。1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士、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年から1980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。

安田 賢一



1965年1月27日生まれ。1990年、長崎大学大学院工学研究科機械工学第二専攻卒業。同年、株式会社安川電機入社、現在基礎研究所ロボットプロジェクト室勤務。1991年から1993年の2年間、東京大学先端科学技術研究センター協力研究員としてテレグジスタンスの研究を行う。