

SF と科学技術における レイグジスタンス型ロボット操縦システムの歴史

大山 英明^{*1} 前田 太郎^{*2} 舘 暲^{*2}

Telexistence Robots: Facts and Fiction

Eimei Oyama,^{*1} Tarou Maeda,^{*2} and Susumu Tachi^{*2}

Abstract - Telexistence, tele-existence, or telepresence, is an advanced form of teleoperation, which enables a human operator to remotely perform tasks with dexterity, providing the user with the feeling that he or she is present in the remote location. Although tele-existence/telepresence as an engineering concept was proposed in 1979-1981, a comic titled "Jumborg A" proposed and illustrated a primitive tele-existence robot control system in 1970. As a matter of fact, some fictitious robot control systems in novels, comics, animations, and movies precede real robot control systems. In this paper, we will introduce the history of telexistence robots, both in terms of current technology and science fiction

Keywords : Telexistence, Tele-existence, Telepresence, Science Fiction, Jumborg A

1. はじめに

近年、日本はロボットブームに沸いている。HONDA の P2、P3、ASIMO や SONY の AIBO の登場により、工場の外に出てオフィスや家庭で活躍するロボットの研究開発への期待が高まっている。しかし、「ロボット研究は、知能の部分が決定的に遅れている。」と多くの研究者が口にしており、現在話題になっているロボットが、環境認識能力や行動計画能力をほとんど、或いは全く備えておらず、作業を行うためには、遠隔制御や人間による再プログラムを必要としている。自律型ロボットの実現には、少なくとも、環境認識、行動計画、運動制御という 3 つの情報処理が不可欠であるが、画像認識を含む外界の認識と適切な行動計画のための情報処理は難問であり、自律ロボット実現のための大きな障害となっている。現時点において、ロボットに定型作業以外の作業を行わせる実用的方法は、人間による操縦である。

人間型ロボットの最も有力な操縦法として、レイグジスタンス方式がある。レイグジスタンスは、舘らによって提案されたロボットの遠隔制御のための概念である [64] [65] [66] [2]。遠隔地にいるロボットの得た感覚情報を操縦者に送り、ロボットが感覚情報を得た状態と同じ状態で操縦者に提示し、また操縦者の動

きに追従してロボットが動くようにすることによって、操縦者はあたかもロボットとなったような感覚で、ロボットを自由に制御でき、遠隔地のロボットに人間の高度な認識能力と柔軟な作業能力を実現できる。レイグジスタンスの概念は日本で提案されたが [64] [65]、前後して、米国では、同様の概念であるテレプレゼンスが提案されている [43] [44] [1]。レイグジスタンス・テレプレゼンス型ロボット操縦方式は、有力なロボット制御方式として活発な研究が続けられている [21] [63] [60] [51] [8]。以下、本稿では、レイグジスタンス・テレプレゼンス型ロボット操縦方式をレイグジスタンス方式と省略して記述することにする。

学術上は、レイグジスタンス方式の提案は 1980 年前後となっているが、その原型と言うべきアイデアは 2.1 にて述べるように、20 世紀初頭より数多くの SF (Science Fiction) に登場していた。そして 1970 年代始めに、日本の漫画並びにテレビ番組にて提案・例解された。小学館の学習雑誌・小学二年生に 1970 年 9 月号より 1971 年 3 月号まで連載された、円谷プロ原作、内山まもる画による「ジャンボグ A」において、操縦者の動作をトレースするように人間型ロボットを動作させる操縦方式が提案・例解されている。本稿では、「ジャンボグ A」を始めとして、小説、漫画、アニメーション、TV 番組、映画等の芸術・エンタテインメント作品に登場したレイグジスタンス方式のロボット・システムを紹介する。さらに、レイグジスタンス方式の技術上の諸問題について概説し、これまでに発表された実在のレイグジスタンス方式の

*1: 産総研知能システム研究部門

*2: 東京大学工学部

*1: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

*2: School of Engineering, The University of Tokyo

ロボット・システムについて紹介する。既に 1986 年に、館によってトレイグジスタンスのアイデアの基になった SF が紹介されているが [67]、本稿では、作品の範囲を、漫画、アニメーション、TV 番組、映画等にも拡大し、さらに、現実のトレイグジスタンス方式のロボット・システムと対比することにより、より具体的な比較検討を行う。

2. ジャンボーグ A

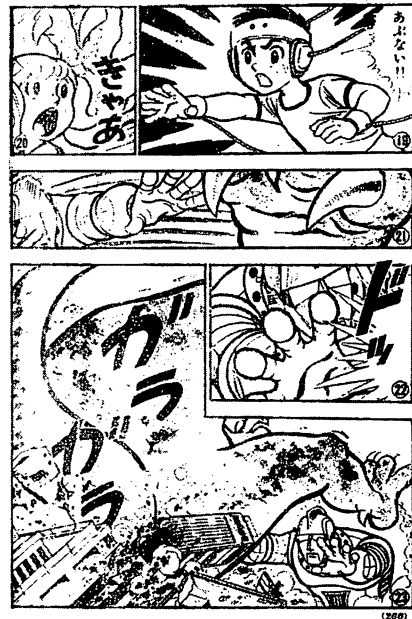
2.1 ジャンボーグ A 以前

ジャンボーグ A について述べる前に、トレイグジスタンス方式の原型というべきアイデアを提案した SF を紹介したい。文献 [37] によると、E. M. Forster は、1909 年の作品 “The Machine Stops (機械が止まる時)” [15] において、名称は別であったが、テレプレゼンスとコンピュータ・ネットワークを予想していた。文献 [47] によると、Amazing Stories 1928 年 10 月号に書かれた J. Schlosel の作品 “To the Moon by Proxy (代理で月へ)” において、遠隔操作によるロボット操縦、さらには遠隔制御されたロボットによる月探検のアイデアが提案・例解された。「改造」1929 年 1 月号に掲載された佐藤春夫による「のんしゃらん記録」[55] にも、映像と音声に加えて、触覚を電送することにより構築された臨場感のある幻影というテレプレゼンスの原型と言うべき概念が登場している。1942 年に書かれた Robert A. Heinlein の作品 “Waldo (ウォルドウ)” [19] では、Waldo という名前の天才科学者が主人公である。彼は地球周回軌道に居を構えていて、地球との接触を保つために、人々に「ウォルドウ (Waldoes)」と呼ばれることになる様々な力帰還型マスター・スレーブ型マニピュレータを開発した。彼は、4x5 フィートの立体カラーテレビを見ながら、マスター・マニピュレータを操縦して、地上世界と接触する。また、人間型ロボットを操って、他人と応対したりする。Minsky は、テレプレゼンスの概念を提案した 1980 年の論文において、“Waldo” に数多くの示唆を得たことを記している [44]。その後、Heinlein は、1959 年の作品 “Starship Troopers (宇宙の戦士)” [20] において、「ただ着さえすれば、君の筋肉から直接に命令をキャッチして、筋肉がやろうとしていることをやってくれる」というパワード・スーツを提案した。ジャンボーグ A 以降の作品ではあるが、James Tiptree Jr. は、1973 年の作品 “The Girl Who Was Plugged In (接続された女)” で、脳神経からのネット経由での他人との「接続」というテレプレゼンス技術を描いていた [74]。

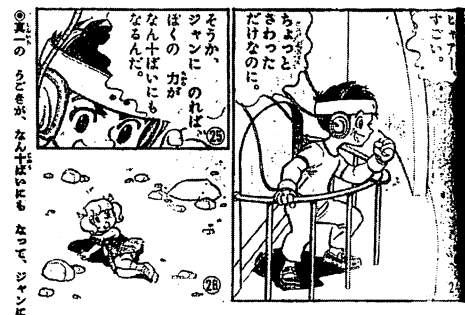
2.2 ジャンボーグ A

小学館の小学生向けの雑誌である小学 2 年生の 1970 年 9 月号にて、円谷プロ原作、内山まもる画による漫

画「ジャンボーグ A」の連載が開始された。本作品において、操縦者の動作をトレースするように人間型ロボットを動かす操縦方式が提案・例解されている。文献 [29] によれば、最初の企画書「空想特撮シリーズ ジャンボーグ A」は 1969 年に書かれており、操縦方式も考案されていたとのことである。



(a) 操縦方式の図解



(b) 操縦方式の説明

図 1 操縦方式のアイデアの提案・例示

人間型ロボット・ジャンボーグ A の操縦方式の基本的なアイデアがはじめて公開されたのは、小学 2 年生 1970 年 10 月号 260 ページ並びに 261 ページである。図 1 にそのページを引用する。図 1(a) において、ジャンボーグ A の操縦者である主人公・真一が女の子を助けようと怪獣を突き飛ばすという動作を行うと、それに連動して、ジャンボーグ A が同様の動作を行う様子が示されている。図 1(b) の図中の「そうか、ジャンにのればぼくの力がなん十倍にもなるんだ。」という台詞と枠外の「真一のうごきが、なん十倍にもなってジャンにつたわるのです。」という解説において、文章により操縦方式が説明されている。ジャンはジャンボーグ A の略称である。説明には力の増幅という点のみしか書かれていないが、漫画の文脈から、操

縦者の動作をトレースし、その力を増幅する制御方式であることが解る。ただし、視覚情報のフィードバックは、操縦者前方にあるスクリーン上にロボットの目にあたる部分より得た映像が写し出されるというもので、テレグジスタンス方式としては不完全なものであった。

操縦者はジャンボーグ A の腹部にある操縦席に搭乗して操縦するため、距離的観点から言えば「遠隔制御」とは言い難いが、パワード・スーツのように、操縦者の姿勢とロボットの姿勢との間に機械的な拘束が無いという点で、技術的には「遠隔制御」に近い。

ジャンボーグ A の操縦方式は、Heinlein の Waldo の方式を発展させたものであるが、(1) スレーブロボットを人間型ロボットとした点、(2) 操縦者の全身の運動をトレースしてスレーブ・ロボットの全身を動かすことを提案した点、特に、下半身への運動指令の生成に利用した点、(3) 格闘のような全身を使うダイナミックな運動生成に用いた点において、工学的新規性が存在するものと評価される。さらに、「ちょっとさわっただけなのに。」という台詞から見て、触覚、力覚或いは力フィードバックが想定されおり、この点については 3.1 にて詳述する。特別な操縦訓練を積んでいない少年がロボットを動かすという基本的設定 [29] の中で、最も合理的な操縦方式として、テレグジスタンス方式の原型というべき方式が提案されたものと推察される。「ジャンボーグ A」は設定を変更されて、毎日放送、円谷プロ制作の TV 特撮番組として、1973 年 1 月 17 日より 12 月 29 日まで、NET(現・テレビ朝日)系にてテレビ放映された。テレビ放映版では操縦席は右目の位置に移動された。操縦者は、VPL Research 社のデータ・スーツのような服を着て、ジャンボーグ A を操縦する。

3. ジャンボーグ A における幾つかの興味深い提案

ある架空の技術が存在したと仮定した場合の周囲の状況を思考実験により、シミュレーションするのは、SF の面白さの一つである [25]。「ジャンボーグ A」では、テレグジスタンス方式の原型を提案するとともに、それをより有効に用いるための様々なアイデアが提案されている。本章では、幾つかのアイデアを取り上げて解説する。

3.1 カノ力覚フィードバック

図 1(b) の台詞からジャンボーグ A の操縦システムが何らかの力ノ力覚フィードバックを行っているという設定である可能性は高い。操縦者に力や力覚をフィードバックすることは作業性に大きな関連がある [6] [32] [56] [7] [40] [8]。Heinlein の Waldo においても、力感覚のフィードバックは行われていると推察さ

れるが、ジャンボーグ A ではダイナミックな運動生成に用いられている点が新しい。

ボクシングの右ストレート、キック・ボクシングの回し蹴り、相撲のぶちかまし等の運動では、相手に接触した時の反力によって、攻撃者は姿勢を適切に保つことができる。逆に、相手にかわされると、バランスを崩し、場合によっては転倒してしまったりする。対象に当たった時の反力が操縦者にフィードバックされなければ、操縦者の体勢とロボットの体勢が大きく異なってしまう、その後の操縦が困難になる。テレグジスタンス方式で全身を使ったダイナミックな運動を行うためには、力フィードバックは不可欠な技術と言える。勿論、現時点において、格闘技のような本格的な力フィードバックを必要とする作業をロボットの作業として想定するのは非現実的であり、多くの作業の場合力フィードバックが無くても十分であろう。しかし、後述するが、テレグジスタンス方式による下半身への運動指令生成の困難は、まさに脚部への力フィードバックが難しいという問題に起因している。将来的には本格的な力フィードバックを必要とする作業も想定されるため、さらなる研究開発が必要である。

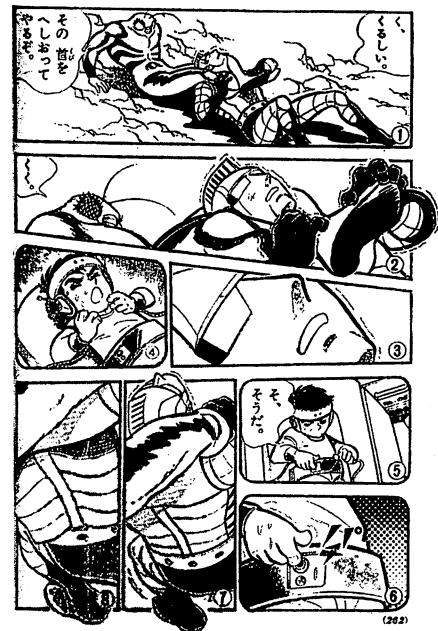


図 2 テレグジスタンス方式以外の指令方式の利用と痛覚フィードバック

3.2 音声入力やスイッチ類との併用

テレグジスタンス方式は、ロボットの運動指令を発生することには非常に有効であるが、ロボットに運動指令を出すこと以外の機能を利用しようとする場合、必ずしも有効ではない。6.4 で述べるテレグジスタンス実験システムは、VR 環境を利用して、作業訓練を行ったり、不可視情報を表示したりする機能を持っているが、これらの機能をテレグジスタンス方式で呼

び出すことは困難である。ジェスチャーを認識して、スイッチとして用いることは可能であるが、作業中に可能で、かつ認識の容易なジェスチャーの設定は簡単ではない。

漫画版「ジャンボーグ A」では、図 2 に示すようなスイッチを利用して、飛行のための背中にあるジェット・エンジンの準備を行い、飛行している。また、「ジャンとべ」といった音声指令によっても飛行を開始する場面がある。数多くの SF 作品において、音声入力によるロボット操縦が提案・例解されていたが、テレグジスタンス方式のロボットでは、初の試みであった。第 6 章で述べる現実のロボット・システムにおいて、音声入力やスイッチ類は効果的に用いられている。

3.3 痛覚フィードバック

図 2 に示すように、その手法は不明であるが、「ジャンボーグ A」の設定では、痛覚フィードバックが行われているらしいことが推察される。これは操縦者の苦痛を見せることによって、映像表現としての効果をねらったものであろう。図 2 の操縦者の感じる苦痛が、3.1 で述べた力/力覚フィードバックの一種である圧力/圧覚のフィードバックの結果であるという可能性もある。しかし、後年の特撮 TV 番組における描写からすると、痛覚フィードバックという現在のロボット制御では全く考慮されない技術である可能性が高い。

現在のロボットは故障すれば、すなわち修理となり、故障箇所をだましだまし使用していくということは少ないが、将来的には、ロボットのフォールト・トレランス機能や自己修復機能 [45] が進化し、ある程度の故障を抱えたロボットを運用する可能性が考えられる。現時点でその実現は困難であるが、痛覚フィードバックは故障の程度を操縦者に伝えるための有力な手段と成る可能性がある。極端な苦痛は不適切であるが、ある程度の範囲で痛覚を伝えることにより、故障箇所を明白に操縦者に伝達でき、故障状況に応じた操縦者の行動を引き出すことが期待される。

4. テレグジスタンス方式の問題点

4.1 テレグジスタンス方式の一般的な問題

テレグジスタンス方式のマスター・スレーブ・システムの構築に当たっての中心的な課題は、次にあげられるようなマスター装置とロボットとの間の様々なミスマッチをどのように解消するかということである。

- (1) 寸法や関節角の可動範囲の違いによる運動学的ミスマッチ
- (2) 時間遅れや発生可能なトルクの範囲の違いを含む動力学的ミスマッチ
- (3) 時間遅れを含む感覚情報のミスマッチ

このようなミスマッチの解決のためには、マスター・システムの改善とスレーブ・ロボットの性能改善が不可欠

であるが、根本的には、6.4 で述べるテレグジスタンス実験システムにおいて採用された拡張型テレグジスタンス (Extended Teleexistence/Tele-existence) 方式が必要となる [68] [71] [51] [52] [53]。これは、Sheridan らによる Supervisory Control 並びに予測ディスプレイ [58] [14] [59] [50] [17] [5] のアイデアを発展させたもので、環境モデリング技術の向上による実環境を正確にコピーした VR 環境を前提として、以下のような方針で、ロボットシステムを動作させる。

- (1) スレーブ・ロボットのセンサデータにより、VR 環境を常に正確なものに保つ。
- (2) 操縦者は VR 環境中で作業を行う。
- (3) VR 環境での操縦者の動作結果と実環境との差が出来る限り小さくなるように、スレーブ・ロボットを動作させる。

実環境と VR 環境の差が許容範囲内に収まっていて、VR 環境中で行った作業によって生成されたスレーブロボットへの指令が実環境でも適切であれば、操縦者は、日常的に作業を行うような感覚でロボットを操作することが可能である。例えば、運動学的・動力学的ミスマッチの結果、人間型スレーブ・ロボットが人間の半分の歩幅でしか歩けなかったとしても、操縦者が VR 環境中で行った 2 歩を、スレーブ・ロボットの 4 歩の動作に変換し、操縦者が 2 歩で移動した状態と一致するように、スレーブ・ロボットが動作すれば、操縦者はスレーブ・ロボットとの違いを意識することなく歩行できる。

勿論、第 1 章で述べたように、環境モデリングの前提となる環境認識能力や行動計画能力は低い。自律型ロボットの実現に比べれば遙かに容易であるが、真の拡張型テレグジスタンス実現には、未だ多くの時間が必要である。

4.2 スレーブ・ロボット

6.7 で述べる HRP (Humanoid Robotics Project) のスーパーコクピットのように、HONDA の P2 の開発によって、本格的な二足歩行ロボットのためのテレグジスタンス方式の操縦席の構築が始まったと言って良い。スレーブ・ロボットの性能向上は、操縦装置の性能向上に直結している。現時点において、総合的に見て、人間の運動能力を越えるロボットは存在しておらず、操縦者は日頃の運動能力を発揮できない。ロボットの性能向上が期待されている。

4.3 ディスプレイ

VR システムを構築するディスプレイ・システムとしては、HMD (Head Mounted Display) が最も一般的であるが、広い視野を確保することが難しいという弱点がある。人間の視野角は周辺視を含めると水平で 200 度、垂直で 170 度あるといわれているが [18]、これら

の周辺視をカバーするようなHMDを製作することは、現在の技術水準では難しい。作業性を無視すれば、より広角なレンズを用いることにより、画像を歪ませて広視野を確保することも可能ではあるが、作業性を重視し、作業環境に操縦者がいた場合に見えるはずの画像を提示することを目指すテレグジスタンス[65][66]の場合、広い視野を確保することは難しい。また、装着が煩わしく、長時間装着していると多くの人間にとって不快であるという欠点もある。そこで、没入型ディスプレイの研究が進められている[9][10][33][24][34]。ただし、没入型ディスプレイをテレグジスタンス方式の操縦システムに用いる場合、操縦者の身体やマスター装置によりスクリーン画像は隠蔽されてしまい、対象に接触しての作業が非常に困難になるという問題点がある。この弱点は、HMDを併用するか、マスター装置並びに、操縦者の衣服・手袋に再帰性反射塗料を塗り、ヘッド・マウンテッド・プロジェクターを用いて隠された画像を投影する[39][30]ことにより部分的に回避可能と予測されるが、さらなる研究・開発が必要であろう。

4.4 下半身への運動指令の生成法

テレグジスタンス方式において、ロボットの上半身への制御は、触覚の提示や腕の全部分を利用した作業[57]において課題を残すものの、これまで開発されてきた手法の軽量化・高精度化・高速化によって対応できるものと考えられる。一方、下半身への運動指令の生成手法の開発は、未だ解決の方向が定まっていない課題である。

その大きな原因として以下の二つある。

- (1) 人間型ロボットの脚による運動能力が、一般に人間に比べて著しく低く、テレグジスタンス方式によって得られた運動指令を実現することが困難であること。
- (2) 下半身からの運動指令取得と下半身への適切な感覚のフィードバックの手法開発は、VR研究における困難な問題として認識されており、マスター装置の構築が困難であること[23][36]。

(1)の課題の解決のためには、4.2で述べたスレーブ・ロボットの性能向上とテレグジスタンス方式によって得られた運動指令をスレーブ・ロボットに実行可能な運動指令に変換する技術の開発が必要である。

(2)の課題の解決のためには、VR研究における移動・運動感覚の提示技術の研究を一層進めることが不可欠である。既に、操縦者の運動を平面に限定した場合については、かなりの程度の移動感覚を提示できるシステムが開発されている[36]。また、可動範囲は制限されているが、地面の凸凹をシミュレートするシステム[35]が開発されている。しかし、全身をダイナ

ミックに動かす運動感覚の提示には数多くの難問が存在する。著者らは、最終的には、可動範囲が狭くなるという弱点があるものの、腰や両足にマスター・マニピュレータを装着する手法が実用的ではないかと考えているが、人間の体重を支えて、さらにダイナミックな運動を可能にできるほどの力を持つマニピュレータ・システムの開発は非常に困難である。システム開発のための実験が、操縦者にとって極めて危険であるからである。P2やP3を創り出した企業レベルの開発体制が無い限り、実用的なシステムの構築は難しいかもしれない。

5. その後の発展:架空のロボットシステム

本章では、漫画・アニメーション・特撮TV番組・特撮映画に登場し、テレグジスタンス方式に類似した操縦法をとり、かつ、発表当時、工学的新規性があったと考えられるアイデアを提案・例解したロボットシステムを紹介する。

5.1 勇者ライディーン-上半身のみのテレグジスタンス方式

1975年4月4日より翌年3月26日まで、NET(現テレビ朝日)系にて放送された、東北新社制作による「勇者ライディーン」においては、上半身への力フィードバック機能を持つマスター・マニピュレータによる上半身のみのテレグジスタンス方式が提案・例解された。本作品で初めて、工学的に明確な手法で力フィードバックが例解されたと言って良い。4.4で述べたように、現時点で下半身への運動指令生成は難しく、6.7で述べるHRPスーパーコクピットでは、「勇者ライディーン」方式が用いられた。

5.2 闘将ダイモス-脳波と筋電流による制御

1978年4月1日より翌年1月27日まで、テレビ朝日系にて放映されたテレビ朝日、東映制作(協力 日本サンライズ)「闘将ダイモス」でも、上半身に関して「ジャンボーグA」方式が用いられた。文献[31]によると、ダイモスは操縦者の筋電流を増幅して動くことになっている。また、脳波の情報も用いられる。さらに、操縦者の生体情報だけでは人間と同じように動けないため、それをダイモス内にある複数のコンピュータが補っているという設定があり、「計算機支援型の操縦システム」が提案されている。1955年、BattyeらによってEMG信号による義手の制御が提案され[4]、長らく研究が続けられ[38][76][12][46]、幾つかの製品も開発されている。EMG信号より筋力やインピーダンス等の重要な情報を抽出できる可能性があり、これを利用してより応答性の良いマスター装置を作成できる可能性がある。脳波については、低いSN比のため、P300等の特殊な脳波を除いて、制御に応用することは困難[13][77]と考えられていたが、独立成分分

析 (ICA:Independent Component Analysis) 等新しい統計手法の発達により、様々な制御に有用な情報を抽出できる可能性がある [11]。

5.3 機動戦士ガンダム—学習型コクピットと CG 画像表示

1979 年 4 月 7 日より翌年 1 月 26 日まで、名古屋テレビ系で放映された、名古屋テレビ、創通エージェンシー、日本サンライズ製作「機動戦士ガンダム」では、「学習型コンピュータ」の助けを借りた操縦という概念が提案された。主人公の学習データが、後発の量産型ロボットに用いられるという描写があるが、具体的に何を学習しているのかは不明である。ガンダムはトレイグジスタンス類似の方式で操縦されているわけでは無いが、将来的なロボット操縦において、学習型コクピットは重要な概念と成りうる可能性があるもので、ここで取り上げておく。

制作者集団ヘッドギアによる「機動警察パトレイバー」は、1988 年に、オリジナル・ビデオ・アニメ作品として誕生し、週刊少年サンデー誌上でも、ゆうきまさみが独自のストーリーを展開、1989 年 10 月 11 日より 1990 年 9 月 26 日まで、サンライズ制作によるテレビ番組が、日本テレビ系にて放送された。その中で、搭乗者に応じてロボット・システムの操縦特性が変化していくという学習機能の描写が行われた。

現時点において、明確な学習能力を持つ現実のロボット操縦システムは存在していないが、筋電や脳波を用いた制御においては学習は不可欠であり [76] [12] [46]、電動義手システムなど要素システムとしては存在している。また、PC のインターフェイス・ソフトウェアには、日本語入力ソフトウェア等、簡単な学習機能を持つものも多い。様々な支援機能を適切に操縦者に提供できるような学習機能があれば、非常に有用と考えられ、今後の研究・開発が期待される。

さらに、富野喜幸 (由悠季) による 1979 年の小説「機動戦士ガンダム 1」(朝日ソノラマ) では、ディスプレイの画像が、通常は実画像で無く、コンピュータ・ゲームのようなアレンジされた画像であるという描写がある。その有効性は不明であるが、4.1 で述べた VR 環境による拡張型トレイグジスタンスに非常に近い位置に到達していたものと評価される。

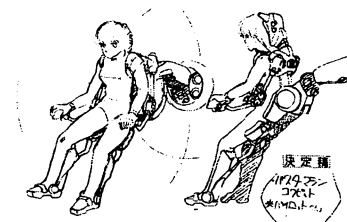
5.4 機動戦士 Z ガンダム—没入型ディスプレイ

1985 年 3 月 2 日より翌年 2 月 22 日まで名古屋テレビ系で放映された、名古屋テレビ、創通エージェンシー、日本サンライズ製作の「機動戦士 Z ガンダム」では、ガンダム MkII の操縦席に没入型の全方位ディスプレイが登場した。ただし、本作品のロボットの操縦方式は、「機動戦士ガンダム」と同様にトレイグジスタンス類似の方式では無い。没入型ディスプレイのロ

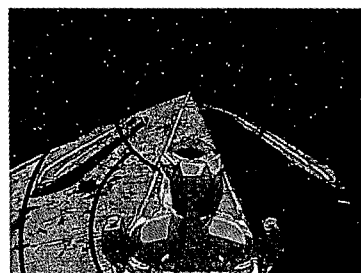
ボット操縦用途への応用では最も早いと考えられる。

5.5 トップをねえ！—全方位ディスプレイと全身用マスター装置

1988 年 GAINAX 制作のオリジナル・ビデオ・アニメ「トップをねえ！」に登場するロボット、ガンバスターの操縦システムは、画像情報の提示法を除けば、トレイグジスタンスの理想に非常に近づいたものである。その操縦システムは、(1) 全身用、カフィードバック機能付きマスター・マニピュレータ、(2) 全方位ディスプレイ、(3) 非トレイグジスタンス方式の操縦を行うもう一人の操縦者との協調操縦という特徴を持っている。全身用力フィードバック付きマスター装置は操縦者の動作範囲が狭くなるという問題点はあるが、4.4 で述べた下半身への運動指令生成問題の解決策の有力候補である。図 3 にガンバスターのトレイグジスタンス類似方式の操縦席の様子を示す。



(a) 両手・両足用マスター・マニピュレータ



(b) 全方位ディスプレイ

図 3 ガンバスターの操縦席 (文献 [16] より引用)

1989 年に制作され、1991 年に公開された、Charles Band 製作総指揮、Albert Band 制作、Stuart Gordon 監督による特撮映画「Robot Jox (ロボジョックス)」でも、トレイグジスタンス類似の操縦方式が提示され、画像情報の提示は通常のモニタによるものの、下半身用マスター・マニピュレータが導入されている。

5.6 機動武闘伝 G ガンダム—スーツによるカフィードバックと選択的立体表示

1994 年 4 月 1 日より翌年 3 月 31 日まで、テレビ朝日系にて放送されたテレビ朝日、サンライズ制作 (協力: 電通、創通エージェンシー)「機動武闘伝 G ガンダム」では、操縦者の動作を計測し、素材の収縮によりカフィードバックを行うスーツが描かれる。スーツの発生する力では、外力による運動量の変化は補償できないが、外力の補償法は不明である。操縦者への通

常の画像提示は立体的では無いが、自分の持つ武器や接近する相手の拳、武器等を選択的に立体的に表示する機能がある。

6. 現実のロボットシステム

本章では、現実開発されたテレイグジスタンス方式の人間型ロボットシステムについて紹介する。

6.1 Mascot

「ジャンボーグ A」掲載の 10 年前の 1960 年頃、イタリア CNEN 研究所の C.Mancini らは、テレイグジスタンスに非常に近づいた移動型遠隔制御ロボット Mascot を開発した [42] [3]。図 4 に Mascot の操縦者とスレーブ・ロボットを示す。スレーブ・ロボットは一見人間型であるが、そのアームは人間とは異構造である。操縦者の目と手の位置関係とロボットのカメラとエンドエフェクタの位置関係は大きく異なっており、テレイグジスタンス方式とは言えないが、非常に近い所に到達していたと言える。テレプレゼンス/テレイグジスタンスの工学的提案の 20 年前であることを考慮すると、Mascot の先進性は驚異である。

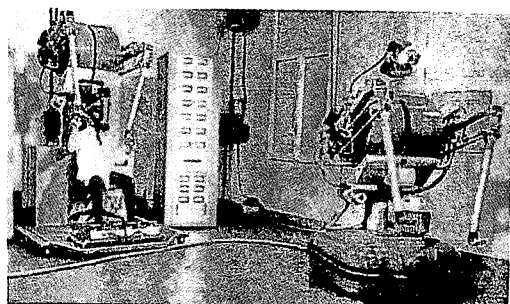


図 4 Mascot

6.2 Greenman

Hightower らは、1983 年から 1988 年にかけて、NOSC(Naval Ocean Systems Center, 現 Space and Naval Warfare Systems Center (SSC), San Diego or SPAWAR) にて、テレイグジスタンス方式の人間型ロボット RPDS(the Remote Presence Demonstration System) を開発した [21] [22]。このロボットは Greenman というニックネームで知られている。図 5 に Greenman とマスター装置を示す。



図 5 Greenman

(Web ページ [61] より引用)

SSC, San Diego では、Greenman システムのハンドには力フィードバックや触覚フィードバックが無く、ディスプレイも低解像度であったが、初心者が訓練無しに色々な作業をこなせたことを高く評価している。

6.3 TOPS

TOPS(TeleOperator/telePresence System) は Greenman の後継プロジェクトとして開発された [60]。TOPS は図 6 に示すように力帰還型の 9 自由度のハンドと 7 自由度のアーム、3 自由度の胴体、ステレオカメラを搭載した 3 自由度のヘッドを持つ人間型ロボットと外骨格型の操縦システムから成る。高機能のハンドにより、様々な道具を使うことができた。操縦者は音声入力とロボットからのカメラ画像に情報を重ねて提示する技術により、様々なモードや機能を利用できた。

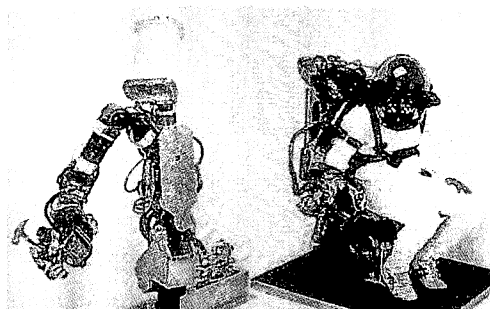


図 6 TOPS

(Web ページ [62] より引用)

6.4 テレイグジスタンス実験システム

テレイグジスタンスの概念を具体化するべく、館、荒井らは、先ず、頭部のみのテレイグジスタンス方式システムを構築した [65] [66] [2]。後継プロジェクトとして、1987 年より開発が進められたテレイグジスタンス実験システムは館、荒井、前田、常本、榊、井上、大山、柳田、安田らによって構築された [70] [71] [51] [41] [52] [53] [72] [78]。

このシステムの特徴は、操縦者とロボットを直接的に結ぶだけで無く、操縦者とロボットの間に VR 環境を介在させた拡張型テレイグジスタンスが導入され、不可視情報の提示や作業訓練のための作業シミュレータ等の機能の提供が行われていることである [68] [71] [51] [52] [53]。ブルーバック合成により、実画像に VR 環境画像を混在させて描画する機能や VR 環境のキャリブレーション機能も付加されていた。この技術は現在、拡張/複合現実感 (Augmented/Mixed Reality) に発展し、活発な研究が行われている。また、スレーブ・アームはインピーダンス制御によって制御され、VR 環境と実環境との間のミスマッチに対して、制限はあるが対応できた。図 7 にテレイグジスタンス実験システムを示す。手前が 7 自由度のアーム、力制御機能付きハンド、ステレオカメラを搭載した 3 自由

度のヘッド、並進の2自由度と回転の1自由度を持つ胴体によって構成される TELESAR (TELE-existence Surrogate Anthropomorphic Robot) であり、奥に見えるのが、HMDの支持機構を持つマスター・システムである。VR環境を利用して、煙によって見えなくなってしまった不可視情報を提示し、煙の中での作業実験に成功した。図8にその様子を示す。



図7 テレイグジスタンス実験システム



図8 不可視環境下での作業

6.5 極限作業ロボット用コクピット

通産省により、1983年から1990年の8年間に渡って推進された「極限作業ロボットプロジェクト」では、4足歩行を行うケンタウロス型の極限作業ロボットの操縦のために、力フィードバック機能を持つ多本指マニピュレータを備えたコクピットが開発された[48][49]。

スレーブと同構造のマスター・マニピュレータの指には、エアシリンダとてこを利用した圧覚発生機構が付加された。画像提示は操縦者前方のスクリーン上に行われるが、テレイグジスタンス方式としては不完全で、ロボットが下を向いているにもかかわらず、操縦者は上の方を見ているというやや不自然な状態で操作を行う。非テレイグジスタンス方式の操縦モードにおいては、必要な情報を画面に提示し、メニュー方式のコマンドを音声で選択出来た。カクテルグラスの把持、ハンドル回し、ロープハンドリング、弁蓋の持ち上げ、重量物の持ち上げ等の様々な作業に成功している。

6.6 TMSUK04

1999年10月、(株)テムザックは、PHS回線を使って遠隔地からコントロールできるヒューマノイド型超遠隔操作ロボット TMSUK04を開発した[75]。図9に

TMSUK04と操縦装置を示す。PHSを用いた遠隔制御技術と、何処にでも持っていきける簡易なコクピットシステムの提案、何度もテレビ番組に登場し、デモンストレーションを行うに足る信頼性は高く評価される。



図9 TMSUK04 システム

(Web ページ [75] 2001 年 10 月 30 日版より引用)

6.7 HRP スーパーコクピット

P3をベースとする人間型ロボットを標準的なプラットフォームとして、人間型ロボットの自律機能並びに操縦技術の高度化を図り、その実用化を目指す国家プロジェクト『HRP (Humanoid Robotics Project): 「人間協調・共存型ロボットシステム」プロジェクト』が1998年より開始された[27][28]。図10に東京大学、松下電工(株)、川崎重工(株)の開発したコクピットの操縦の様子を示す[73][26]。この操縦システムの大きな特徴は、(1)没入型立体ディスプレイ、(2)本格的な力フィードバックが可能なマスターアーム、(3)浮動椅子、(4)音声入力や3次元マウスによる下半身への運動指示等である。脚部へのマスター装置は無く、「勇者ライディーン」方式で操縦されるが、直ぐに連想されるのが5.5のガンバスターのコクピットであり、そのイメージの類似性には笑みを漏らさずを得ない。



図10 HRP スーパーコクピット

4.3で述べたように、没入型ディスプレイの問題点の一つは、操縦者の身体やマスター装置によって、映像が隠れてしまい、ロボットによる作業が困難になってしまうことである。HRP スーパーコクピットでは、対象に近接して作業を行う場合のためのHMDを併用している。スクリーンの跳ね上げ機構を持つHMDに

より、没入型ディスプレイとHMDの切り替えは容易に行うことが可能である。

HRP スーパーコクピットは、脚部へのマスター装置を持っておらず、「移動と作業時にバランスを取ることはロボットに任せる。」という方策を採用している。操縦者は、ロボットの下半身の状態を反映するように動く浮動椅子に座っており、ロボットの下半身の状況に応じて、適切な上半身運動を生成し、作業を行う。すなわち、操縦者は乗馬して作業を行っているような状態にある。デモンストレーションでは、ぬいぐるみの箱からの持ち出しやフォークリフトの操作等に成功しているが、どれくらい多様な作業が可能かどうかの検証は今後の課題である。

現時点における本コクピットの問題点として、力フィードバックを組み込んだ作業シミュレータを備えていないため、コクピットを動作させるには、スレーブ・ロボットを動かすための大人数のスタッフと時間が必要なことがあげられる。早急なシミュレータの開発が望まれる。

7. おわりに

芸術・エンタテインメント作品と過去の技術的発展とをレビューすると、ロボット操縦の分野では、現実の技術と芸術・エンタテインメント作品が相互に影響しあい、発達してきたことが伺える。

幾つもの技術的アイデアが芸術・エンタテインメント作品の中で描かれてきた。芸術・エンタテインメント作品の価値は、その中で描かれる技術予測が当たっていたかどうかとは直接的に関係は無い。しかし、新技術の予測や新技術が存在した場合の周囲状況のシミュレーションが、作品の楽しさに一役かっているのも事実であり、多くの魅力的なアイデアが描かれてきたというのも事実である。優れた技術予測を行った作品に関する知識は、VRに携わる技術者の教養の一つとなるべきものだ、我々は考える。いかなる表現形態をとっていても、技術的アイデア自体は評価可能と考えるからである。

なお、著者らの浅学非才のため、見落とししてしまった作品やロボット・システムが多々あるものと思われる。気のつかれた方にはご教示をお願いしたい。

謝辞

有益なコメントをいただいた査読者の方々に深謝します。エンタテインメント作品に関するご指導また重要なコメントをいただいた産総研・梶田秀司氏、藤原清司氏、阪口 健氏、筑波大学大学院・田窪朋仁君、資料をお送り下さった産総研・谷江和雄知能システム部門長、東京大学・川上直樹講師、(株)松下電工・星野 洋氏、資料をお教え下さったダイモス・ファン倶楽部管理人ヒビキ様に深謝いたします。テレグジスタンス実験システムのソフトウェア構築の中心であった旧通産省機械技術研究所の故・常本直貴氏の冥福を心からお祈り申し上げます。

参考文献

- [1] D.L.Akin, M.L.Minsky et al.: Space application of automation: Robotics and Machine Intelligence Systems

- (ARAMIS)-Phase II, NASA Contract Report 3734(1983)
- [2] H. Arai, S. Tachi and I. Miyajima: Development of a power-assisted head-coupled display system using a direct-drive motor, The International Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.3, No.2, pp.123-130(1989)
- [3] H. A. Ballinger: Machines with Arms, Science Journal, October, pp.58-65(1968)
- [4] C. K. Battye, A. Nightingale, and J. Whillis: The Use of Myoelectric Currents in the Operation of Prosthesis, J. Bone and Joint Surg., 37B, pp.506-510(1955)
- [5] A. K. Bejczy, W. S. Kim, S. V. Venema: The Phantom robot: predictive displays for teleoperation with time delays, Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.546-511(1990)
- [6] F. P. Brooks, M. O. Young, J. J. Batter and P. J. Kilpatrick: Project GROPE-Haptic Display for Scientific Visualization, Computer Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH'90), Vol.24, No.4, pp.1777-185(1990)
- [7] G.C. Burdea et al.: A Portable Dextrous Master with Force Feedback, PRESENCE, Vol.1, No.1, pp.18-28(1992)
- [8] G.C. Burdea: Invited review: The synergy between virtual reality and robotics, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15, No.3, pp.400-410(1999)
- [9] C. Cruz-Neira, D.J. Sandin, T.A. DeFanti, R.V. Kenyon and J.C. Hart, The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment, Communications of the ACM, Vol. 35, No. 6, pp.65-72(1992)
- [10] C. Cruz-Neira, D.J.Sandin, T.A. DeFanti, "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE," Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH '93), pp.135-142(1993)
- [11] A. Delorme, S. Makeig, M. Fabre-Thorpe, and T. Sejnowski: From Single-Trial Erps to Brain Area Dynamics: Sequential Activations During Rapid Categorization of Natural Images, Proc. of CNS*2001 (2001)
- [12] F.A. Farry, I.D. Walker and R.G. Baraiuk: Myoelectric Teleoperation of a Complex Robotic Hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.12, No.5, pp.775-788(1996)
- [13] L.A. Farwell and E. Donchin: Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, Electroenceph. Clin. Neurophysiol., pp. 510-523(1988)
- [14] W. R. Ferrel and T. B. Sheridan: Supervisory control of remote manipulation, IEEE Spectrum, Vol. 4, No.10, pp.81-88(1967)
- [15] E.M. Forster: The Machine Stops(1909) (小倉多加志訳「機械が止まる時」 in SF マガジン 1964 年 4 月号)
- [16] GAINAX: トップをねええ! コレクターディスク, VOL.2.
- [17] T. Hashimoto and T.B. Sheridan: Effects of Predictive Information in Teleoperation with Time Delay, Japan Journal of Ergonomics, Vol. 22, No.2(1986)
- [18] 畑田豊彦: 空間視知覚での心理物理学, 仮想現実学への序曲, 共立出版, pp.65-77(1996)
- [19] R. A. Heinlein: Waldo (1942) (早川 亘訳「魔法株式会社」ハインライン傑作集 (3) 早川文庫 SF SF498 に収録)
- [20] R. A. Heinlein: Starship Troopers(1959) (矢野 徹訳「宇宙の戦士」早川文庫 SF SF230)
- [21] J.D. Hightower, D.C. Smith, and S.F. Wiker: Development of Remote Presence Technology for Teleoperator Systems, 14th Meeting of the United States-Japan Natural Resources Committee(1986)
- [22] J.D.Hightower, E.H.Spain et al.: Telepresence: A hybrid approach to high-performance robots, Proc. of '87 International Conference on Advanced Robotics(ICAR), pp.563-573(1987)
- [23] 廣瀬通孝: バーチャルリアリティ, 産業図書, pp.82-85(1993)
- [24] 廣瀬通孝, 小本哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発, バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.2, pp.137-140(1997)
- [25] 星野 力: SF 中の科学技術, 計測自動制御学会誌, Vol.41, No.3(2002)
- [26] Hoshino, H. et al.: Development of a Visual Display System for Humanoid Robot Control, Proc. of HCI International 2001, pp.703-707(2001)
- [27] H. Inoue and S. Tachi, et al.: Humanoid Robotics Project of MITI, The first IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, Boston, Sept.(2000)
- [28] 井上博元, 比留川博久: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp.2-7(2001)
- [29] 岩佐陽一: 最終回にほえろ! 3, 同文書院, pp.120-135(2000)
- [30] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi: X'tal Head: Face-to-Face Communication by Robot, Conference Abstracts and Applications of SIGGRAPH 2000, p.99(2000)
- [31] 石神信也編集: なんでもブレイ百科 (17)「スーパーロボット3大全科」, 双葉社 (1980)
- [32] H. Iwata: Artificial Reality with Force-feedback: Development of a Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Computer Graphics (Proc. of SIG-

- GRAPH'90), Vol.24, No.4, pp.165-170(1990)
- [33] 岩田洋夫: 菱形 12 面体を用いた全立体角ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.1, pp.91-94(1996)
- [34] 岩田洋夫: シームレス全周球面ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.3, pp.155-158(1998)
- [35] 岩田洋夫: 凹凸面を提示する仮想歩行装置 GaitMaster, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回全国大会論文集, pp.345-348(1999)
- [36] H. Iwata: Walking About Virtual Environments on Infinite Floor, Proc of IEEE 1999 Virtual Reality Annual International Symposium(1999)
- [37] K. Jacobson (ed.): Simulations: 15 Tales of Virtual Reality, Citadel Twilight Press(1993)
- [38] (the late)I. Kato, Development of Waseda Robot -The study of Biomechanisms at (the late) Kato Laboratory-, Humanoid Robotics Institute, Waseda University.
- [39] N. Kawakami, M. Inami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi: Object-Oriented Displays: A New Type of Display Systems -From immersive display to Object-Oriented Displays-, Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics '99(1999)
- [40] T. Kotoku: A predictive display with force feedback and its application to remote manipulation system with transmission time delay, Proc. of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'92), Vol.1, pp.239-246(1992)
- [41] 前田太郎, 荒井裕彦, 館 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, Vol.10, No.5, pp.99-109(1992)
- [42] C. Mancini and F. Roncaglia: Il servomeccanismo elettronico MASCOT I del CNEN, Alta frequenza, Vol. 32, No. 6, pp.379-392(1963)
- [43] M. Minsky: Toward a Remotely-Manned Energy and Production Economy, A.I. Memo No. 544, AI Laboratory, MIT(1979)
- [44] M. Minsky: Telepresence, Omni, Vol.2, No.9, pp.44-52(1980)
- [45] S. Murata, E. Yoshida, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji: Self-repairing mechanical systems, Autonomous Robots, Vol.10, No.1, pp.7-21(2001)
- [46] 西川大亮, 倉文偉, 横井浩史, 嘉数侑昇: 筋電義手制御のためのオンライン学習法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.9, pp.1510-1519(1999)
- [47] 野田昌宏: 図説ロボット 野田 SF コレクション, 河出書房新社, pp.16-17(2000)
- [48] K. Ohnishi, T. Oomichi et al.: Development of Working Multifinger Hand Manipulator, Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and System (IROS'90)(1990)
- [49] 大西 献, 大道武生: 実証機用多本指マニピュレータ作業システム, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.628-637(1991)
- [50] M.V.Noyes and T.B.Sheridan: A Novel Predictor for Telemanipulation Through a Time Delay, Proc. of 20th Annual Conf. on Manual Control, NASA Ames Research Center(1984)
- [51] E. Oyama, N. Tsunemoto, Y. Inouse and S. Tachi: Experimental Study on Remote Manipulation Using Virtual Reality, PRESENCE, Vol.2, No.2, pp.112-124(1993)
- [52] 大山英明, 常本直貴, 館 暉, 井上康之: 仮想環境と実環境の重ね合わせのための一手法, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, pp.272-281(1994)
- [53] 大山英明, 常本直貴, 前田太郎, 館 暉: 仮想環境へのテレグジスタンスのための一手法, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, pp.1175-1182(1994)
- [54] 榊 泰輔, 館 暉: インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (III), 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.3, pp.114-117(1992)
- [55] 佐藤春夫: のんしゃらん記録, 改造, No.1(1929) (佐藤春夫「新潮日本文学 12 佐藤春夫集」新潮社, 1973 年発行に収録)
- [56] M. Sato: A Story of SPIDAR, Proc. of The 10th. International Conference on Artificial Reality and Tele-existence(ICAT2000), pp.15-18(2000)
- [57] J. K. Salisbury: Whole-arm manipulation, Proc. 4th Int. Symp. Robot. Res.(1987)
- [58] T. B. Sheridan: Three models of preview control, IEEE Trans. on Human Factors in Electronics, Vol.HFE-7, No.2, pp.91-102(1966)
- [59] T. B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, Cambridge, MIT Press(1992)
- [60] M.S. Shimamoto: TeleOperator/telePresence System (TOPS) Concept Verification Model (CVM) Development, N.K. Saxena, ed., Recent Advances in Marine Science and Technology, '92, pp.97-104(1992)
- [61] SSC, San Diego: <http://www.spawar.navy.mil/robots/telepres/greenman/greenman.html>
- [62] SSC, San Diego: <http://www.spawar.navy.mil/robots/telepres/tops/tops.html>
- [63] L. Stark et al.: Telerobotics: Display, Control, and Communication Problems, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.1, pp.67-75, 1987.
- [64] 館 暉, 谷江和雄, 小森谷 清: 感覚情報提示機能をもったマニピュレータの操縦方式, 特許 1 4 5 8 2 6 3 号, 出願 1 9 8 1 年 1 月 4 日
- [65] 館 暉, 阿部 稔: テレグジスタンスの研究第 1 報, 第 21 回 SICE 学術講演会予稿集, pp.167-168(1982)
- [66] S. Tachi, K. Tnatie, K. Komoriya and M. Kaneko: 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 (RoManSy84), pp.245-254(1984)
- [67] 館 暉: テレグジスタンス-未来の夢と現在の技術-, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.3, pp.89-94(1986)
- [68] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-existence Simulator with Artificial Reality, Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and System (IROS'88), (1988)
- [69] 館 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, Vol.7, No.4, pp.314-326(1989)
- [70] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-existence Visual Display for Remote Manipulation with a Realtime Sensation of Presence, Proc. of the 20th International Symposium on Industrial Robots, pp.427-434(1989)
- [71] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-existence Master Slave System for Remote Manipulation, Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robotics and Systems (IROS'90)(1990)
- [72] 館 暉, 安田賢一: テレグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価, 電気学会論文誌 C 編, Vol.115-C, No.2, pp.172-181(1995)
- [73] 館 暉, 小森谷 清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三: HRP 遠隔操作プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No.1, pp.16-27(2001)
- [74] James Tiptree Jr.: The Girl Who Was Plugged In, (1973) (伊藤 典夫, 浅倉 久志 訳「愛はさだめ, さだめは死」早川文庫 SF SF730 に収録)
- [75] テムザック株式会社: ホームページ <http://www.tmsuk.co.jp/> (2001 年 10 月 23 日現在)
- [76] 辻 敏夫, 市延弘行, 伊藤宏司, 長町三生: エントロピーを用いた誤差逆伝搬型ニューラルネットワークによる EMG からの前腕動作の識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.10, pp.1213-1220(1993)
- [77] T.M. Vaughn, J.R. Wolpaw, and E. Donchin: EEG-Based Communication: Prospects and Problems, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol.4, No.4, pp.425-430(1996)
- [78] 柳田康幸, 館 暉: クラスを用いた仮想環境の構成法, 電気学会論文誌 C 編, Vol.115-C, No.2, pp.236-244 (1995)

(2001 年 11 月 9 日受付)

[著者紹介]

大山 英明



1987 年東京大学大学院工学研究科修了。同年工業技術院機械技術研究所入所、2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門所属。人間の運動制御系の学習モデル、テレグジスタンス等に関する研究に従事 (工学博士)。

前田 太郎

(正会員)



1987 年東京大学工学部卒業、同年機械技術研究所入所。1994 年東京大学大学院工学系研究科助手、1997 年同講師、2000 年東京大学情報学環講師、現在に至る。人間の感覚統合モデル、テレグジスタンス等に関する研究に従事 (工学博士)。

館 暉

(正会員)



1973 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、同年東京大学助手、機械技術研究所等を経て、1989 年東京大学先端科学技術研究センター助教授、1992 年同教授、1994 年東京大学大学院工学系研究科教授、2001 年同大学大学院情報理工学系研究科教授、現在に至る。信号処理、盲導犬ロボット、テレグジスタンス等に関する研究に従事 (工学博士)。日本 VR 学会初代会長を務める。