

〔解説〕

テレグジスタンス*

——未来の夢と現在の技術——

館

障**

1. はじめに

tele- という接頭辞は、distance を意味し、distance は“separation in space or time”，つまり時空の隔たりであると定義されている。

一方、existence とは“state or fact of being”つまり存在することである。

すなわち、時間あるいは空間ないしはその両者を隔てて存在することがテレグジスタンスであり、人間の太古からの一つの夢である。

テレグジスタンスという言葉は用いずとも、人間の感覚・行動能力の拡張へのそのような夢は人間の共通の興味であり願望であったため、古くからイマジネーションの世界で広がっている。種々の言葉や文学の世界にその一部が記録されており、そのような古くからの人々のイマジネーションの世界の一端を垣間見ることができる。

例えば、千里眼などの言葉はそれを端的に表している。

近年の科学技術の進展は、このイマジネーションの世界にとじこめられていたこの種の願望の一部をテレグジスタンスという概念のもとに現実の世界にひきずりだした。すなわち、計測制御、エレクトロニクス、通信、情報処理、メカトロニクスのバックグラウンドのもとに、ロボティクスの考え方と人間の感覚や運動の生理学的・心理学的知見とによって遠隔に存在する感覚を人間に与えつつ知能ロボットを自由に操ることを可能とするテレグジスタンスの技術が生まれ、育ちつつある。

本解説では、まずイマジネーションの世界で語られていたテレグジスタンス的な願望の一部を探る。次に、現在、実際の工学ないしは技術として確立されつつあるテレグジスタンスについて述べ、近未来に確実に実現されるであろう機能と、それを達成するための課題を整理する。

最後に、そのような工学的・科学技術的な裏づけにもとづいて実現はかなり先になるにしても今後予想されう

るであろうイマジネーションの世界を著者なりに展開する。

2. 過去のイマジネーションの世界を探る

中国の古典、西遊記の中で孫悟空は自らの髪の毛から多数の分身を作り、それを自在に操る。いわゆる分身の術である。

世に伝わるマロリーのアーサー王物語は、明治の文豪夏目漱石により薙露行として書き改められ紹介されている。その中で、シャロットの女は高き臺の中に只一人住み、有りのままの浮世を見ずして鏡に写る浮世のみを見る。マーリンの術になると言う黒鏡の黒きを磨きて本来の白きに帰した躍ける五尺に余る鏡は、古き幾世を照らして、また今の世のありとあらゆる物を照らす。女は夜毎毎に鏡に向い、夜毎毎に不断の繪を織るのである。

かくのごとく古今、あるいは洋の東西を問わずイマジネーションの世界ではテレグジスタンスの原型が数多くあらわれる。しかし、これらはすべて、かくありたし、あるいは、かくあるべきといった情景を記述したのみであって、その具体的な実現方法を示唆するようなものではない。まして、科学の方法に立脚しているわけではない。

フランスのジャン・ガッテニョの主張するように、サイエンス・フィクション (SF) は科学とともに生れるのであって、厳密には科学や応用科学の存在しない限り SF も存在しないと言ってよいだろう。ここでは、神話の世界や、いわゆるサイエンティフィック・ファンタジーの世界は除外して、あらゆる分野での発見と発明、技術の無限の発展を仮定しなければならないにしろ、可能性のある世界としてイマジネーションを働かせる本来の SF に限定して、テレグジスタンスの原型を探ることにする。

テレグジスタンスは、その言葉の響きから、これまで SF の世界で多く語り継がれてきたように思われる。しかし、実際には、あまり扱われていないのである。まして、名称は全く使われていない。

ここでの議論を正確にするために、テレグジスタンスであるための要件を二つあげておく。

原稿受付 1986年5月8日

* Tele-existence—future dream and present technology—

** 機械技術研究所

① テレイグジスタンスを利用する本人は、現在の場所にいたままであり空間的にも時間的にも移動しない。

② それでいて、自分の知りたい遠隔での起き事が手にとるように分かり、またそこで自分の行いたい行動ができる。

①については、自分が実際に移動するSFは数限りなくある。有名な、物質転送装置で、遠隔の地へ自分自身を送る話や、アルフレッド・ベスターの「The Stars My Destination」(1956年)で紹介されたジョウント効果はその好例である。ジョウントでは、行くべき場所と自分のいる場所を完全かつ正確に視覚化する能力と、目的地に到着するための精神エネルギーとで瞬間的に移動ができるとされる。

時間の移動は、H. G. ウェルズの「The Time Machine」(1895年)にあらわれる*。時間に関する科学知識を駆使して、世界で初めての近代的科学小説をなしたものとして極めて評価が高いものである。タイムマシンは、過去から未来にのびる時間という次元を、あたかも空間の上を移動するがごとく行き来する。

しかし、これらはテレイグジスタンスではない。テレイグジスタンスでは、本人は全く移動する必要がないからである。分身が、移動したり、あるいは、遠隔の地にすでにいる物を利用して、そこから得た情報を人に正確に与え、その分身が自分の思うように行動してくれれば、そこに自分がわざわざ行く必要は全くないのである。

②については、その情報が自分の得たいものでなくてはならない。テレビの中継のように、受動的なものではなく、自分がそこで行動した時に得られるような能動的な感覚情報でなくてはならない。

また、シャロットの女のように、ただ世の中に起こることを観察しているテレオブザーバではいけない。自分が、その場で行動することが可能であることがテレイグジスタンスでは極めて重要である。その点、テレプレゼンスが臨場という点を主としているのに加えて、テレイグジスタンスは、行動が自由自在にできることを重要視している。

もう一つ、似ていて全く異なる概念にサイボーグや、ロバート・A・ハインラインの「Starship Trooper」(1960年)の機動歩兵がある。機械と人間の筋肉組織、神経系統を結合し、あらゆる能力を限界まで引き出す。

テレイグジスタンスでも、その分身のロボット的能力によって、人間の感覚能力や運動能力は著しく拡大される。しかし、テレイグジスタンスでは、人が、機械を手術でつけたり、重い物を着こんだりする必要は本質的にはないのである。人と遠隔の分身ロボットとの間の情報伝達チャンネルと信号変換装置さえしっかりとしていればよい。

また、人間の限界を超えるような刺激や運動までも人にフィードバックする必要もない。マスタ装置とスレーブが分離されていることは、空間的な分離だけではない大きな違いがある。

テレイグジスタンスの概念とはほぼ同様な考え方が用いられた数少ないSFの一つとして、フレッド・セイバーヘーゲンの「Brother Berserker」(1969年)があげられる。舞台は、タイムトラベル可能な特殊な時空構造を持つ地球に似た惑星サーゴル。そこに、いづことも知れない宇宙の深淵からやって来た、殺戮のための戦闘機械軍団が襲う。過去の世界を襲う敵と闘うために、デロンはマスタスレーブアンドロイドを用いる。スレーブアンドロイドが、タイムトリップとして、マスタは、現在にいたがらにして、過去で行動する。

このSFでは、デロンたちオペレータが着るマスタユニットと、スレーブアンドロイドを極めてヴィヴィッドに記述している。もっとも、現在の技術からすれば、このような複雑な懸架装置にぶらさげられた潜水服のようなおどろおどろしいマスタ装置は必要ではないが。

3. テレイグジスタンス技術の現状と課題

3.1 テレイグジスタンス技術

離れたところにいる人間(操作者)が、ロボットのある場所で直接作業しているかのような高度の臨場感をもって、ロボットを遠隔操作できないものであろうか。

つまり自分の分身のロボットが自分の代わりに仕事をしていて、それでいて、その状況が手にとるように分かる。また必要な時には、そのロボットに代わって、自分でその仕事を直接しているような感覚を持ちながら実行できる。こうした、自分の分身を持ったような高度の遠隔制御技術をテレイグジスタンス技術と呼んでいる。これは、現実の技術として確立されつつある。

テレイグジスタンスでは、人間の運動や力などが実時間で計測され、内部状態が推定される。その内部状態がロボットに伝達され、直接ロボットの運動制御システムをコントロールし、人の動きを忠実に再現してロボットの人工の目、首、手、足などを制御する。その時のロボットの人工の感覚器からの情報は、逆にすべて人間の感覚器に直接提示される。

従って、例えば人間が見たい方向を向けば、ロボットも同一の方向を向いて、そこに人がいた時に見える情景に対応する像を、人の網膜上に実像として結像する。人が自分の腕を目の前に持ってくると、視野内にはロボッ

* マーク・トウェインはすでに1889年「A Connecticut Yankee in King Arthur's Court」で同様の試みを行っている。

トの腕が自分の腕のかわりに全く同一の位置関係で現れてくる。

このようにして、人は自分の手と対象物、さらには周りの空間との関係を、自分の過去の経験と同一の関係で捉えて作業ができる。ロボットが物体に触れた感覚は、人の手に皮膚刺激として提示され、人は自分で直接触れたのに似た感覚をもって作業できる。

また、テレグジスタンス技術は、人間の感覚の範囲にとどまらず、さらに広い範囲に人間の感覚能力を拡張できる。つまり、ロボットの有する放射線、紫外線、赤外線、マイクロ波、超音波、極低周波などのセンサ情報(超感覚情報とも呼ばれる)をも積極的に利用できる。

例えば赤外線センサ情報を可視光に変換して、臨場的に提示することで、暗闇の中でも、明るい場所で作業しているような錯覚をもって作業が行える。

また、これらの超感覚情報を、通常の視覚ディスプレイ上にスーパーインポーズすることもできる。それも通常のスーパーインポーズではなく三次元的な重ね合わせである。例えば、物体までの距離を物体の存在する場所に重ねて空中映像として提示することや、本来、見えるべき映像を差し引いて、変化した部分のみを臨場的に示すことなどが挙げられる。

作業能力の拡大も可能である。テレグジスタンスの基本システムでは、道具や機械を人間並みに器用に操作して作業を行うことを目的とし、ロボットの機構も人間に類似したものを目指している。しかし、人の力を増大

して作業を行うことも可能である。つまり、人は軽い物を持ち上げているような錯覚を持ちながら、しかも臨場感を失わずに重量物のハンドリングを器用に行えるシステムである。

1960年代に米国において人が機械の中に入って操縦するエグゾスケルトン型と呼ばれる人力増幅機械が研究された。この研究は、ロボット技術がまだ未成熟であったことに加えて、人がロボットの中に入りこむという危険をはらんだ設計思想自体が問題で実用に至らなかった。しかし、テレグジスタンスの概念を発展して、この問題に用いれば、人力増幅機の中に人が入りこむというような危険なことをしなくとも、人が中に入っているのと同等の感覚を確保しながら制御し、作業を行うことができるわけで、60年代の夢が、いままさに実現されようとしていると言える。

逆に、小さな力に対応することも可能である。例えば血管などの手術を、あたかもゴムホースを扱っているかのように、しかも臨場的に行うような拡張の方向も考えられる。

このように、テレグジスタンス技術は、工場やプラント・コンビナート内の危険劣悪環境内作業、原子力プラントの点検・修理作業、宇宙や海洋での探索、修理、組み立て作業、災害時における搜索、人命救助、復旧作業、通常時においては清掃事業、土木建設作業、農林水産業、医療福祉、警察、探検、レジャー用、テストパイロットやテストドライバーの代替など、広範囲の応用が

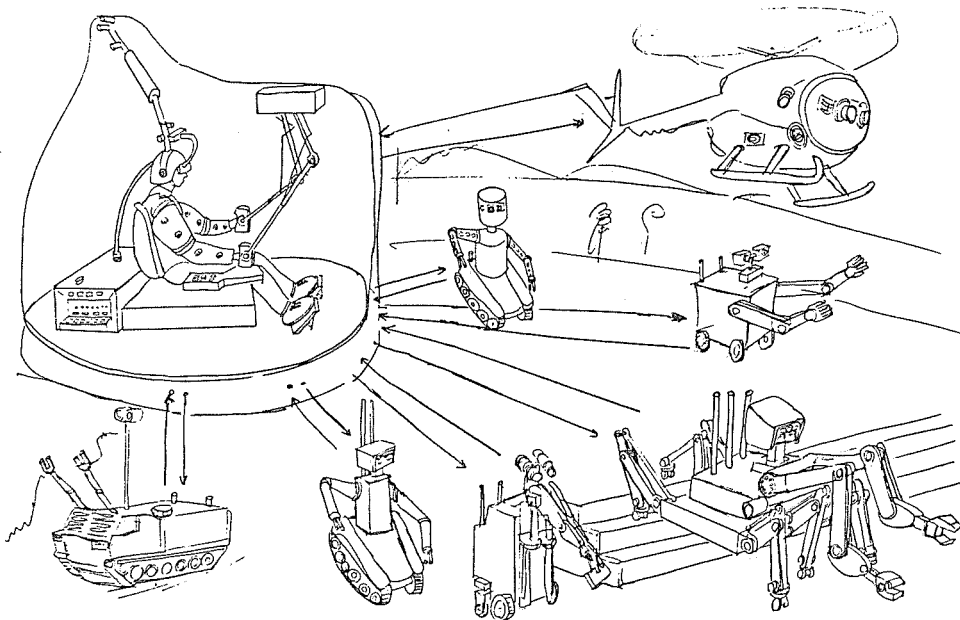


図1 テレグジスタンスを用いた人間ロボットシステム

考えられている。

トレイグジスタンスで用いるロボットは知能ロボットである。従って、人は複数のロボットを制御することも可能である。図1に、人間・ロボットシステムの1例を示す。

複数台の自律移動型知能ロボットが、コントロールカプセル(統制装置)内の人間の命令に従って、遠隔の作業環境内で作業を分担し、かつ必要に応じて共同しながら働いている。

その作業分担やプランニング、スケジューリングは、スーパーバイザリコントローラが受け持ち、各知能ロボットからは、仕事の進行ぶりに関する報告が逐次送られてくる。それらはスーパーバイザリコントローラで整理され、例えば音声で人に伝わる、人は自然言語に近い言葉で命令を下し、判断結果を伝えれば、音声認識装置、スーパーバイザリコントローラを経て、各知能ロボットへの命令として伝達される。知能ロボットは目的を理解して、自らの知識を知的に活用して目的の遂行をはかる。

ロボットの感覚器の情報は、ロボットの知的動作のための重要な情報源であるが、それらは人によっても随時モニタされる。知能ロボットが、独自の能力で対処しえない困難な作業の局面に直面した時、ロボットからの要請あるいは人間の判断で、そのロボットに適切な命令を与えることができる。

そのような命令だけでは解決できないと、人間が判断した場合には、人間はそのロボットをトレイグジスタンスモードに切りかえて、直接的に制御を行うのである。

3.2 テレイグジスタンス技術の特徴

遠隔にある機械の腕(マニピュレータ)を器用に操るための、いわゆる遠隔操縦の概念はテレオペレータ(teleoperator)とか、テレチア(telechir)と呼ばれている。これは戦後の原子力用のマニピュレータや切断者用の動力義手などの技術とともに生じた概念である。テレオペレータでは、人から機械に向かう制御系が強調され

ているが、機械から人への感覚フィードバックは、対称型や力帰還型で力の情報をオペレータに伝える程度であり、人がその場で作業をしているような臨場感を持ちながら作業をすることはできなかった。

機械からオペレータへの感覚フィードバックを臨場感の高いものとするための研究が近年になり盛んになりつつある。これは、テレプレゼンス(tele-presence)¹⁾、リモートプレゼンス(remote-presence)²⁾、あるいはトレイグジスタンス(tele-existence)³⁾⁴⁾⁵⁾と呼ばれている。

これらは、ねらいはほぼ同一ではあるものの、実現の方法や、システムの考え方などで若干の相違がある。

特にトレイグジスタンスでは次の3つの点が強調されている。

(1) 作業に適した高度の臨場感を有すること。人間への感覚の提示を視覚、聴覚、触覚を中心として極めて臨場感の高いものとする。これは、単に背景の環境や対象物だけではなく、自分の手などの位置関係も含めて実現されなければならない。すなわち、トレイグジスタンス系で見えるものはオペレータの手ではなく、オペレータの手の位置にあるかのごとく見えるロボットの手でなくてはならない。また、これは人の手の動きに追従し器用に作業できるものでなくてはならない。

(2) 遠隔にあるロボットが自律機能を持った知能ロボット(オペレータの分身)であること。従来の遠隔操縦と異なり、ロボット自体も、自律機能を持ち、ルーチン的な仕事はオペレータなしに解決でき、必要に応じて、ロボットの要請あるいはオペレータの判断によってトレイグジスタンスモードに移行される。これにより、オペレータが、つまらない仕事にかかわらなくとも済み、また複数台のロボットを同時に制御することが可能となる。

(3) 人間能力の拡張が可能であること。

3.3 テレイグジスタンスの実現法と課題

このようなトレイグジスタンスの基本システムの構成法を明らかにするため、臨場的な提示の具体的な構成方

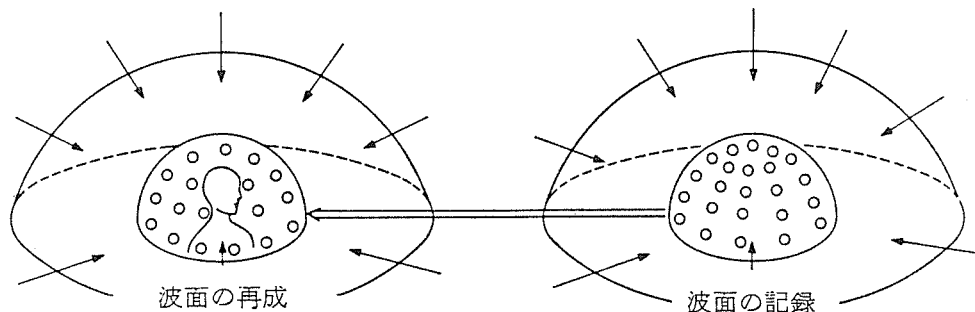


図2 従来の感覚情報の臨場的提示の考え方

法を視覚を例にとって説明してみよう。

従来の方法は波面の忠実な再構成というところに力点を置いていた。つまり、遠隔のロボットが存在する場所の周りに閉曲面を作り、そこに入り込む波面を閉曲面上の多数個の点で記録する。それを遠隔のオペレータのいる場所まで伝送し、オペレータの周囲に作った同様の閉曲面上の再生装置から波面の再構成を行う(図2)。しかし、この方法は、

(1) 記録・再生の装置が実物大の環境再構成をねらうと非常に大きなものになってしまい実際的ではない。

(2) 遠い背景のディスプレイならば、この方法でも可能であっても、近くの物体については再生をリアルに行うことが技術的に極めて困難である。

(3) 特に、オペレータの手がロボットの手の位置と異なる場所に見えてしまえば、本当の臨場感は得られないわけで、ロボットの手の見えるはずの所にオペレータの手が見えなくてはならないが、そのような状態の実現は、この方法では一般に困難である。

従って、背景と作業対象およびロボットの手の関係が自分がロボットの中にある、あるいは自分がロボットになって、かわってロボットのいる場所に存在するといった真の存在感は得られない。

図3はロボット技術と人間の感覚構造を基にしたテレイドジスタンスの構成方法である。

人の視覚の基礎は、網膜上に写る2枚の画像である。それらは人の頭の動きや目の動きにつれて実時間で変化する。人はその2枚の画像をもとに3次元世界を頭の中で作り出し、それをその物体が実際に存在するところに再投影している。従って、人の頭の動きや目の動きを忠実に実時間で測定して、それに合わせてロボットの頭や目を動かし、その時ロボットの視覚入力装置に写った2枚の画像を人間の網膜上に適当な変換を施し写し出してやれば、人はロボットのところで直接見たのと同等の網

膜像を得ることができる。つまり、それらの画像を用いて、そこで直接見たのと同等の3次元世界を頭の中で作り出し実世界に再投影できるのである。

人の手や体幹の動きも実時間に忠実に測定して、その情報によりロボットのマニピュレータや体幹部を動かせば、オペレータが自分の手を目の前に操ってくると、ロボットの手が目の前に同じ位置関係で現れてくる。従って、従来のディスプレイの持つ(3)の問題点も解消できることになる。

テレイドジスタンス技術の研究開発課題としては、知能ロボットの進展に加えて次の要素技術が挙げられる。

- ① 生体運動・生体状態の計測、推定技術
- ② 人間類似ロボットとその制御
- ③ 人工の感覚器による外界情報検出技術
- ④ 臨場感覚情報提示技術
- ⑤ 人間能力の拡張技術
- ⑥ マスタ・アシスト用知識ベース
- ⑦ スーパーバイザリ・コントロール
- ⑧ テレコミュニケーション

4. 未来へのイマジネーション

近未来におけるイマジネーションの世界は既に3.1で述べた。この技術が完成すれば、人間が現在行っている仕事の大半は、人間は管制室に居ながらにして、分身の知能ロボットを操って、直接作業するよりも効果的に行うことができるようになる。もっとも、現状の科学技術の延長で空間を隔てて光速ないしは、それに近い速度で送れるものはエネルギーと情報であって、物質の伝送は行えないので、物質が関連した部分で不完全となるのは、今のところやむを得ない。

さて、ここでは現在技術に立脚したテレイドジスタンスの遠未来について若干の考察を行うこととする。テレイドジスタンスを行うには、オペレータ側にあるマスタ

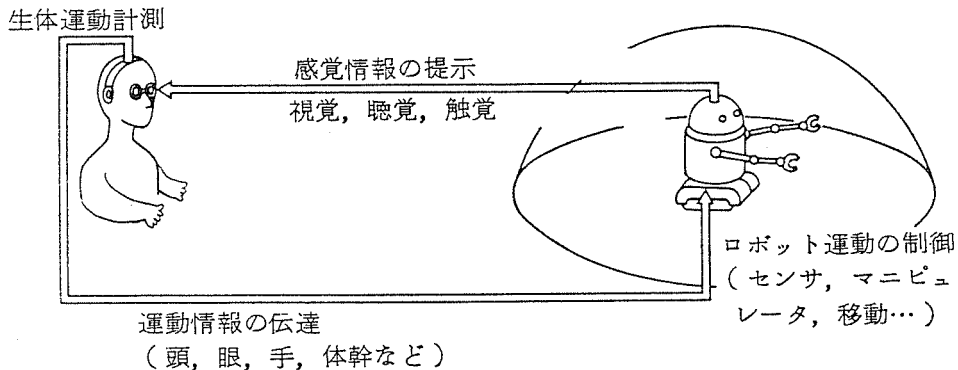


図3 テレイドジスタンスにおける感覚情報の臨場の提示法

用制御装置と、遠隔の地で働くスレーブの知能ロボットが必要である。その知能ロボットは、オペレータの側で作成し、それを使用する場所に送りこむ。これが普通の使い方である。しかし、それでは仕事をする度に物質の移動が必要となり、使い始めるまで時間がかかる。情報とエネルギーの遣り取りだけで済まないものであろうか。

それは、具体的な実現法は未知であるが、思考実験としては次の三通りの方法で可能である。

第一の方法は、使う場所でスレーブの知能ロボットを現地にある物質を使って作る方法である。もっとも作るための製造装置だけは、作るためのスレーブ知能ロボットと共に最初に送りこむ。その後は、現地でそれらを用いて大量に作る事ができる。この方式によれば一度だけは物質の移動が必要であるが、その後はその必要がなくなる。

第二の方法は、その遠隔の地に既に存在する生物をそのまま用いる方法である。その生物の感覚器からの情報を得て、それを解読しそれに基づいて遠隔のオペレータが情報を得る。つまり、その生物の目を用いて見、耳によって聞く。それに従って適切な指示を与えれば、適切な行動がその生物の手足を用いて行える。しかし、この方法の欠点は、その生物がそのような感覚情報を得たり制御情報を与えたりするのに適した構造を有している保証のないことである。そこで、やはり一度は、その場にトレイグジスタンスの知能ロボットシステムを送りこみ、それを用いて生物を改良する必要がある。一度改良を行えば、その性質は遺伝によって引き継がれるので、永くその生物を用いてトレイグジスタンスが行えるようになる。

第三の方法は、遠隔の地の環境そのものに働きかけて、自己組織的に上記に適したロボットないしは生物を作り上げることである。もっとも、これには天文学的な年数が必要であり、長期的な計画を要する。

ここに述べた方法は、将来人類が地球以外の場所で仕事をしたい場合などに特に有効であると考えられる。逆に考えると、人類も人類以外の何かによって、そのような計画によって制御されている可能性もあながち頭から否定はできないこととなり、不思議な感覚におちいる。

その昔、トレイグジスタンスの考えとその技術的实现法に思い至らなかつた時分、ubiquitous (=being or seeming to be everywhere at the same time) と言う言葉を初めて耳にして、何と言う荒唐無稽な概念かと思いつつも何か引かれるものを感じた。トレイグジスタンスの概念とその実現可能性を掌中にして、自分がトレイグジスタンスで複数台の知能ロボットを自在に制御すれば ubiquitous と同じ事になることに思い至り、あらため

てこの言葉の深い意味に驚愕の念を覚えたのであった。

5. おわりに

トレイグジスタンスは新しい夢を提供しつつある。と言うのは、自らは居ながらにして、自分の分身が様々な世界で活躍することが可能となるからである。しかも、その分身の経験はそっくり自分の経験として吸収することができるのである。

本解説では、昔から SF などイマジネーションの世界で語られてきたトレイグジスタンスの原型と対比しながら、現実の世界で研究開発が進められている実際の技術としてのトレイグジスタンスを説明した。そして最後に、その科学技術的な裏付けに立脚した未来のトレイグジスタンスについてイマジネーションの世界を展開した。

なお、SF については、古今のものすべてに目を通すことは到底できない。実際には抜け落ちている物が多くあることを恐れる。著者がトレイグジスタンスを提案した 1980 年以前の SF でトレイグジスタンスという言葉が使われていたり、同業の概念が具体的方法論を伴って記述されている書物を御存じの方は、是非著者まで御一報下されれば幸甚である。この場を借りてお願い申し上げます次第である。

参考文献

- 1) J. D. Hightower and D. C. Smith, "Teleoperator technology development" 12th Meeting of UJNR/MFP, pp. 43-47, 1983.
- 2) J. Lyman, 私信.
- 3) 館 障, 小森谷清, "第三世代ロボット", 計測と制御, Vol. 21-12, pp. 1140-1146, 1982.
- 4) S. Tachi et al., "Tele-existence (I): Design and evaluation of a visual display with sensation of presence", Proc. 5th Int. Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (CISM-IFTOMM RoManSy '84), pp. 245-254, Udine, Italy, 1984.
- 5) S. Tachi and H. Arai, "Study on tele-existence (II): Three-dimensional color display with sensation of presence", Proc. '85 Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR), pp. 345-352, Tokyo, Japan, 1985.



館 障 (Susumu TACHI)

昭和 21 年 1 月 1 日生れ。昭和 43 年東京大学工学部計数工学科卒業。48 年同大学院博士課程修了。工学博士。48 年東京大学助手。50 年通産省機械技術研究所研究員。主任研究官を経て、現在ロボティクス部遠隔制御課長。パイスペクトルを用いる統計的信号処理、電気刺激による情報伝達、盲導犬ロボット、トレイグジスタンスなどの研究を行う。54 年～55 年、マサチューセッツ工科大学 (MIT) 客員研究員。58 年 IEEE/EMBS 論文賞受賞。計測自動制御学会、日本 ME 学会、バイオメカニズム学会、日本機械学会、IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)