

人工現実感
解説
特集

テレイグジスタンスと人工現実感*

舘 障**

Tele-Existence and Artificial Reality / Susumu TACHI

Key words: tele-existence, telepresence, artificial reality, virtual reality, telerobotics, master-slave system, teleoperation

1. はじめに

テレイグジスタンスは、時空の隔たりを意味する tele- という接頭辞と存在を意味する existence との合成語であって、人間が時間ないしは空間、あるいはその両者を隔てて存在するという概念を表す新造語である。テレイグジスタンスという言葉は用いずとも、人間の感覚・行動能力を何らかの手段を講じて拡張することは、人間の太古からの夢であり願望であったため、古くからイメージーションの世界で展開されてきた¹⁾。しかし、それらはすべて、かくありたし、あるいは、かくあるべきといった状態や情景を表したものであって、その具体的実現方法を示唆するものではないし、まして、科学の方法に立脚しているわけでもなかった。

近年の科学技術の進歩は、このイメージーションの世界にとじ込められていた、この種の夢の一部をテレイグジスタンスという概念のもとに現実の世界に引きずり出した。すなわち、計測制御、エレクトロニクス、通信、情報処理、メカトロニクスの技術的背景のもとに、ロボティクスの考え方と人間の感覚運動制御に関する生理学的・心理学的知見を融合させることによって、時空を隔てて存在する感覚を人間に与えつつ、その空間内で自在に行動することを可能とするテレイグジスタンスという技術が生まれ、育ちつつある²⁾。

テレイグジスタンスを大別すると、実世界 (real

world) へのテレイグジスタンスと、コンピュータ等の創製した実際には存在しないが、極めて現実感あふれる世界 (仮想世界: virtual world) へのテレイグジスタンスに分かれる。前者は、遠隔臨場感覚とか遠隔臨場制御と呼ばれる遠隔現実 (tele-reality) であり、後者は仮想現実 (virtual reality) であって、両者とも人工現実感 (artificial reality) とも称される。

人工現実感とは、テレイグジスタンスを別の観点から表現した言い方で、人間がいま現在実際に存在している環境以外の仮想環境 (virtual environment) を、あたかもそれが現実の環境のような感覚を持って体験し、かつその仮想世界で行動することを可能とする技術である。あえてその差を表現すれば、テレイグジスタンスでは、人間が自分がいま存在する世界とは別の世界に行くという感覚に対して、人工現実感とは人間が現在存在する場所に別の世界を持ってくるという感覚を強調している。しかし、これは実際には相対的な関係であり同一の効果である。従って、以下この解説ではテレイグジスタンスを用いて両者を表す (図1参照)。

では、なぜテレイグジスタンスを使うのか。テレイグジスタンスをあえて一言で言えば、人間の空間的制約を超越するための試みとも言える。それも、テレビジョンのように受動的な情報の提供ではなく、あたかも、その場所にいるかのように感じ、そのなかで行動することのできる人工の現実感を有する環境を提供することを目指している。

そのような観点でテレイグジスタンスの使われる目的を整理すると次のようになろう。

(1) 原子力、海洋、防災、宇宙などの極限作業の代

* 原稿受付 平成3年6月18日

** 東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区駒場4-6-1)

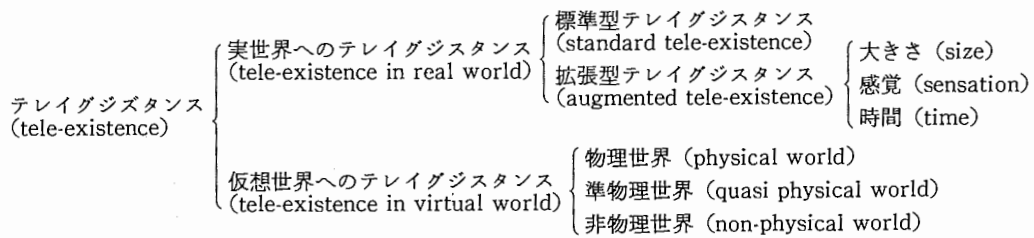


図1 テレイドジスタンスの分類

替；建設，鉱業分野での利用，(2)テレマシーニング等新しい生産支援手段としての第二次産業製造分野，(3)テレファーマー等農林水産業等の第一次産業分野への適用，(4)清掃や保守点検，各種サービスなど第三次産業分野，(5)テレイドジスタンス旅行などのレジャー，アミューズメント，ゲーム，(6)マイクロサージェリー等医療分野での活用，(7)臨場感通信などコミュニケーションへの利用，(8)電子体験シミュレータなど究極のシミュレータとしての教育分野での応用，(9)仮想製品など人工現実感による設計支援(CAD, IMS ; Intelligent Manufacturing System)，(10)仮想環境を用いたインテリアデザインなど意匠，デザイン分野，(11)サイエンティフィックビジュアライゼーションなど科学技術研究の手段，(12)臨場感ディスプレイ等人間や生物の機能解明の新しいツールの提供，(13)言語表現，絵画表現を含みつつ越えた新しい思考や感性の表現方法の提供。

2. 実世界と仮想世界への テレイドジスタンス

2.1 実世界へのテレイドジスタンス

ロボットを利用した実世界へのテレイドジスタンスは，標準型と拡張型とに分かれる。標準型は，基本的には人間と同一の形状や感覚機能を有するロボットを想定し，そのロボットを用いて遠隔の地へ実時間ないしは，無視できる程度の時間遅れで臨場することを目指している。すなわち，その目標は，実際に存在する遠隔の環境内にオペレータがロボットの力をかりて，あたかも自分自身がそこにいるかのような実時間臨場感を有して作業することを可能とするところにある。一方，拡張型ではロボットの形状や感覚機能において人間と異なる場合や無視できない時間的な隔りがある場合のテレイドジスタンスである。例えば，マイクロロボットをあたかも自分が小さくなったかのような感覚を有して自分の分身のように制御する場合や，逆に，巨大ロボットを自分が巨人になったような感覚で操る場合が大きさにおける拡張である。

また，標準型テレイドジスタンスでは人間が通常感

じる感覚チャンネルの内，感覚を有する周波数帯の信号のみを扱っているが，その枠を取り払い感覚能力の拡張を図ることも可能である。すなわち，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）をも積極的に利用する。例えば，ロボットの赤外線センサを利用して環境を探索し，その結果をコンピュータグラフィクスと3次元提示技術を利用して提示すれば，暗闇の中で物を明るい所で見るとような臨場感をもって見ることができる。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インポーズすることもできる。それも通常のスーパインポーズではなく，3次元的な重ね合わせである。

時間的な拡張も可能である。惑星探査など宇宙空間での利用を考えた場合，通信に要する時間が無視できない。通常のテレオペレーションで直接制御可能な時間遅れは0.1秒程度までとされている。そのような場合でも，拡張型テレイドジスタンスの方法では遠隔のロボットが自律ロボットであるため，理論的には次のようにすれば制御できる。ロボットはあらかじめ環境内を探索し環境のモデルを作成する。このモデルが遠隔のオペレータ支援コンピュータシステムに送られ，コンピュータはモデルとオペレータの状態から適切かつ臨場的な視聴覚や触覚力感覚などの情報提示を行う。オペレータはこの臨場的擬似環境に対して作業し，その状況のエッセンスが遠隔のロボットに送られる。ロボットはテレイドジスタンスモードではこの送られた指令を解釈して作業するとともに，必要に応じて環境のモデルを追加したり修正したりする。指令どおり行くと不都合な場合にはモデルが正しくないわけで，安全な状態で停止し，新しいモデルを推定し，状態とモデルをオペレータに送る。オペレータは新しいモデルに基づく臨場的擬似環境に対して作業し直す。こうして，実際には計算量の問題やモデルの推定など多くの未解決の問題を含むが，理論的には時間的拡張が可能となる。

2.2 仮想世界へのテレグジスタンス

コンピュータの創製する仮想世界は、物理世界、準物理世界、非物理世界に大別される。物理世界は、今我々の住んでいるこの地球上と同一の物理法則の働く世界である。設計の支援や仮想製品による評価あるいは、通常教育訓練用シミュレータに用いられる仮想環境はこの物理世界でなくてはならない。

一方、準物理世界へのテレグジスタンスも考えられる。準物理世界とは例えば、月の世界とか、量子力学が支配するミクロな世界とか、相対性理論の顕著な光速に近い世界などを仮想的に構成したものである。これは、全く未知な世界を体験的させ学習させる教育や訓練の分野で有効である。

アミューズメントで代表されるレジャーや芸術などへの応用を考えた時、上記の物理法則に基づく世界に限る必要はない。むしろ、ファンタジーの世界とも言える奇想天外な夢の世界が求められる場合も多い。それが、非物理世界である、非物理世界は芸術的にはほかの二つに比べて実現しやすい。むしろ芸術的感覚が要求される。そして、この人工現実感による表現方法は、言語表現や絵画表現を含みつつ越えた、概念や考え方や感性などを表現する新しいメディアとしての可能性も秘めており、その意味でも着目されている。

3. テレグジスタンス研究開発の現状

図1にテレグジスタンスの概念と実世界へのテレグジスタンスの開発状況を示す。現在までに、視覚提示システムの設計法を中心として研究³⁾が進められ、視覚提示システムの設計法が明らかにされている。理想的な臨場感提示方式では、直接視における三次元空間のすべての手がかりが、提示装置を介しても直接視の場合と同等に得られなければならない。輻輳、両眼視差、像の大きさ、水晶体調節などの主要な手がかりを直接視の場合と同等に保存した立体ディスプレイ提示装置において、さらに、観察者の動きによって対象画面が適切に変化して、正しい運動視差を伝えるように設計されたものは能動立体ディスプレイと呼ばれる。テレグジスタンスで用いられるディスプレイは、これにあたる。

人が単色で空間を知覚する際のパラメータとして、(a)水晶体調節筋肉緊張弛緩、(b)網膜像の大きさ、(c)両眼の輻輳角の三つがある。理想システムを介した場合、それを利用する人間の視覚における上記(a)~(c)のパラメータの値は、直接視の場合の(a)~(c)のパラメータの値とそれぞれ等しくなる。従っ

て、理想システムでは、直接視と同一の視覚情報が得られていることになる。

次に、理想システムの簡略化を試みる。人の視覚の特性を調べると、(a)については、水晶体の調節を20 cmに固定しても、10~50 cmの輻輳範囲に対して自然な両眼像の融合が生じ、1 mにすれば20 cmから無限遠までの輻輳範囲に対応できる。したがって、提示像の距離 X_n を常に $X_n=1$ mに固定しても臨場感は失われない³⁾。提示距離を一定距離に固定すれば制御すべき変量は網膜像の大きさと両眼の輻輳角の二つになり装置の簡略化が可能となる³⁾。簡略化システムでは、十分広い範囲にわたって人間オペレータの周りにロボットの作業する空間と同一の空間を再現している。従って、人間の眼球運動を計測しロボットの眼球運動を制御する必要はない。

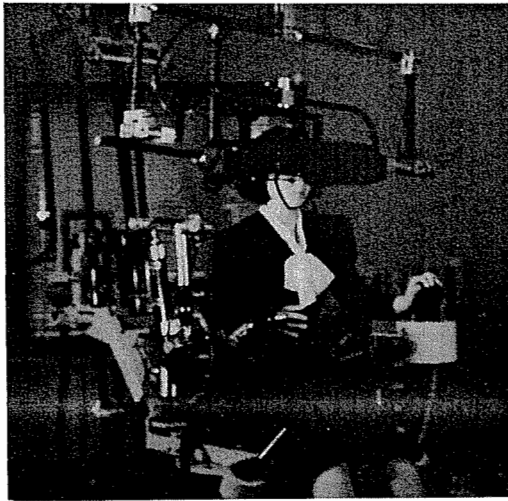
図2の上部に示すマスタ装置は、前述の設計法に基づいて構成されている。人間の頭部運動を計測するのに、左側のシステムでは重力に対するカウンタバランス機構を持った6自由度ゴニオメータを用いている。上部右側のシステムでは、頭部搭載型とし、頭部運動は、磁気センサにより非接触に行っている。

一方、テレグジスタンスシステムの基本概念を確認するための遠隔制御ロボットシステムが試作され実験されている。図2の下部右に示すマニピュレーション作業用のテレグジスタンスシステムはその一例である。形状や自由度配置を人間のそれらに類似させて構成した人間型スレーブロボットであり、3自由度の首機構のうゑに人間に次元を合わせたステレオカメラとマイクロホン及びスピーカを搭載している。ロボットの右腕は人間と自由度配置と寸法を同一にした7自由度マニピュレータで1自由度のハンドを有している。テレグジスタンスマスタスレーブ装置を用いた作業実験が行われ、従来の2次元ディスプレイとの比較の結果、テレグジスタンス方式の優位性が検証されている^{6)~8)}。

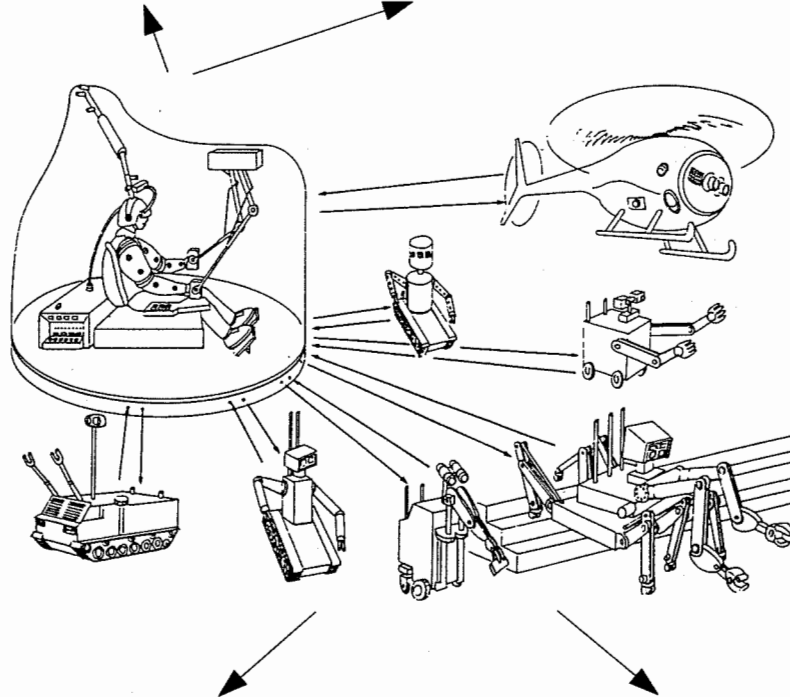
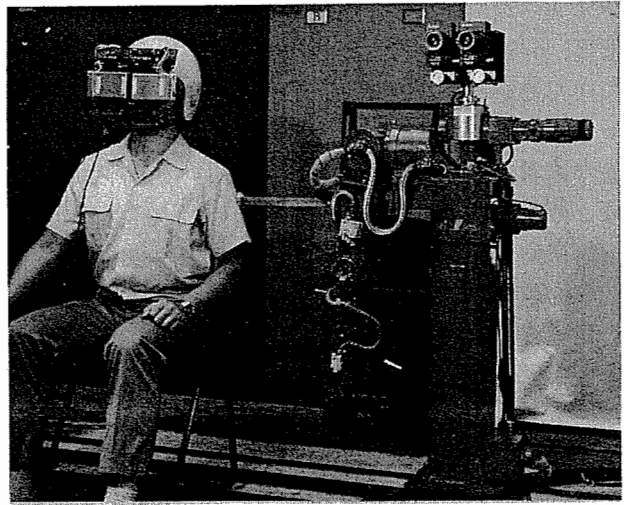
このようなマニピュレータを運ぶことをめざした移動型テレグジスタンスシステムも研究されている。図2の左下に示すように研究所の構内を利用した走行実験の結果、障害物のある環境でも自分で自動車を運転しているような感覚で操縦制御可能なことが示されている。

なお、米国のNOSC (Naval Ocean Systems Center)でもNOSC Teleoperated VehicleとNOSC Teleoperated Robotを用いたテレプレゼンスの研究が行われている⁹⁾。またNASAでは、火星での利用を目的としたテレプレゼンスジオロジストの研究開発が開

マスタ装置とオペレータ



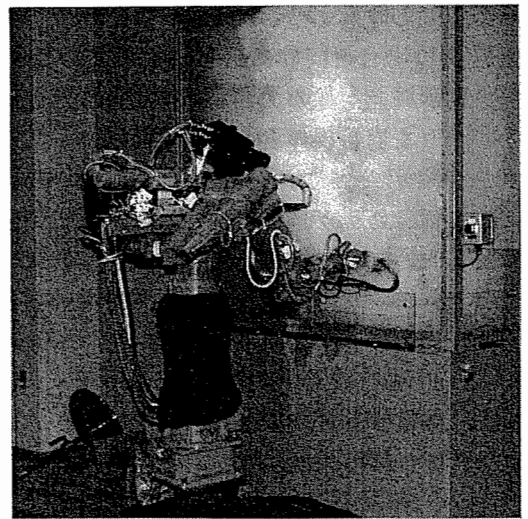
頭部搭載型ディスプレイとスレーブロボット



テレグジスタンス
技術の展開



移動テレグジスタンス技術



作業実験中のテレグジスタンススレーブロボット

図2 テレグジスタンスの概念と研究開発の現状

始されている。

さらに、仮想空間へのトレイグジスタンスの研究は、現在、機械技術研究所、東京大学、筑波大学、東京工業大学のほか、米国のNASAエイムズ研究センターで進められている⁹⁾。オペレータは、両目を覆うヘルメット搭載型のディスプレイ装置をかぶり、機械が作り出す人工現実の中で移動し作業する。人間の動作は、データグローブと呼ばれるオプティカルファイバセンサを用いた装置で測定され、それがコンピュータへの指示となる。ちなみに、このデータグローブは米国のVPL社が製品化したもので、現在、体全体の運動を計測するボディスーツや、三次元実時間コンピュータグラフィクスを提示するためのアイフォンもVPL社から販売されている。

これらの道具立てを利用して仮想インタフェース環境を構築しコンピュータとインタフェースする新しい概念が提案されている。人間は物理的ターミナルではなく仮想コントロールパネルに対し指示を行う。多数のウィンドウを任意の3次元位置に任意のサイズでオープンすることが可能である。このようなシステムにより、狭い部屋にも多数の装置を切り替えながら置くことが可能となり宇宙用のコックピットなどへの利用が考えられている。なお、東京大学¹⁰⁾、筑波大学¹¹⁾、ATR¹²⁾、東京工業大学¹³⁾においても、コンピュータとの自由なインタフェースを目指して同様な研究が精力的に行われている。

4. おわりに

トレイグジスタンスは1980年に機械技術研究所から生まれ育った我が国独自の技術であり、大型プロジェクト「極限作業ロボット」の研究開発計画の一つの大きな柱の役割を担った。現在では、その工学的実現可能性が理論的にも、また実際のハードウェアシステムによる実験からも実証され、基本システムの設計法が明確になった。さらに、本研究の成果は海洋作業の実証機にも組み込まれ実用に近づいている。

なお、同様の考え方が、米国ではミンスキーによりテレプレゼンス (Telepresence) とよばれ、近年NASAを中心として盛んになっている。また、人工現実感や仮想現実の概念が米国で生まれ研究開発や製品化が急速に進んでいる。その意味では、日本が米国の物真似でない技術で、しかも世界で注目され21世紀へのキーテクノロジーの一つと見なされるに至った新しい概念とそれを裏付ける基礎技術を日本独自に10年間かけて育ててきたといえる。今後の展開において、ぜひとも世界に対してその独自性を主張し続

け、誤解による日米のあらたなる摩擦を避ける必要があると考える。

さて、トレイグジスタンスは、極限作業やいわゆる3K作業のロボットによる遂行を可能にするにとどまらず、人間の太古からの夢の一つである人間の能力を最大限発揮して人間を、いわばスーパーマンに成長させることにもつながる可能性を持った技術といえよう。これにより、いままでは不可能だった体験が可能となるほか、従来の文字表現、絵画表現、音楽表現を含みつつ超えた新しい人間の思考や感性の表現法として進展しつつある。将来のいわゆる「疑似体験文化」へと発展する可能性をも秘めており、科学技術の範ちゅうにとどまらず、人間の社会生活や文化へも多大な影響を与えてゆくであろう。

参 考 文 献

- 1) 館 暉, 阿部 稔: トレイ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, (1982) 167.
- 2) S. Tachi et al.: Tele-existence (I) - Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proc. 5th Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy 84), CISM-IFTOMM, Udine, Italy, (June 1984) 245.
- 3) 館 暉, 荒井裕彦: トレイ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, 4 (1989) 314.
- 4) D. L. Akin et al.: Space Application of Automation: Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS) - Phase II, NASA Contract Report 3734, (1983).
- 5) J. D. Hightower et al.: Telepresence: A Hybrid Approach to High-performance Robots, Proc. '87 Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR), Versailles, (Oct. 1987) 563.
- 6) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Development of Anthropomorphic Tele-existence Slave Robot, Proc. Int. Conf. on Advanced Mechatronics, Tokyo, (1989) 385.
- 7) S. Tachi and T. Sakaki: Impedance Controlled Master Slave System for Tele-existence Manipulation, Proc. First Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics (ISMCR '90), Houston, Texas, (June 1990).
- 8) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-existence Simulator with Artificial Reality, Proc. IEEE Int. Work Shop on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, (1988) 719.
- 9) S. S. Fisher et al.: Virtual Environment Display Systems, ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, North Carolina, (1986) 1-11.
- 10) 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ンインタフェース, ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 東京, (1988) 201.
- 11) 岩田洋夫: 大規模仮想空間を歩行するための人工現実感, Human Interface, 5 (1990) 49.
- 12) 竹村治雄, 岸野文郎: 人工現実感によるヒューマンインタフェース, テレビジョン学会誌, 44, 8 (1990) 981.
- 13) 佐藤 誠ほか: 3次元形状モデリングのための仮想作業空間, 3D映像, 4, 2 (1990) 27.