

4. システム化とその応用

4-1 テレイグジスタンス

館 障[†]

1. ま え が き

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構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) と称される。

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敢えて一言でいえば、人間の空間的制御を超越するための試みともいえる。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る。

- (1) 原子力、海洋、防災、宇宙などの極限作業の代替、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2次産業製造業分野
- (3) テレファーマー等、農林水産業等の第1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3次産業分野
- (5) テレイグ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) マイクロサージャリー等、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)
- (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

[†] 東京大学 先端科学技術研究センター

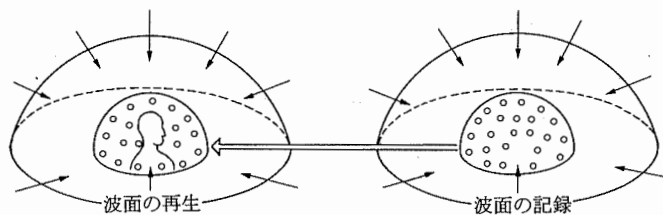
“Systemize and Its Applications; TELE-EXISTENCE” by Susumu Tachi (RCAST, The University of Tokyo, Tokyo)

2. テレイグジスタンスの原理

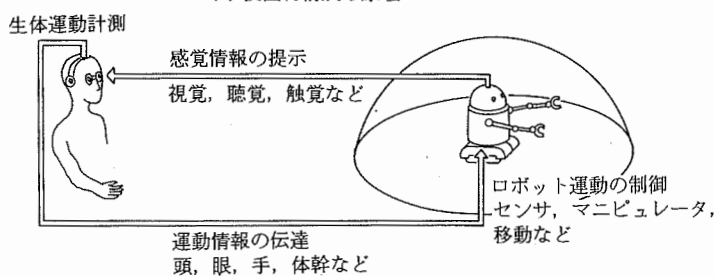
図1にテレイグジスタンスの基本システムの構成法を示し、これにおける臨場的な視覚提示の具体的な構成法を説明する。

図1(a)は、従来から考えられているホログラフィなどにおける波面の記録と再生の原理を示す。つまり、遠隔のロボットの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存在する場所まで伝送し、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。しかし、この方法のままでは、以下に述べる理由からテレイグジスタンスの実現は困難である。

- 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。また、ホログラフィでは、実時間の情報の記録・再生が現在の技術ではできない。
- ② 遠い背景のディスプレイならば、2次元の大型スクリーンなどで近似すれば可能であっても、近くの物体の再生を3次元かつ実物大で実時間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。テレイグジスタンスでは、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。したがって、背景と作業対象およびロボットの手の関係が自分のロボットの中にある、あるいは自分がロボットにな



(a) 波面再構成の原理



(b) テレイグジスタンス視覚提示システムの構成

図1 テレイグジスタンスの原理

り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1(b)はロボット技術と人間の感覚構造を基にしたテレイグジスタンスの構成方法である。

(a)の方法では、全波面を同時に再現しようと試みているが、実際に人の視覚の仕組みを考えると、全波面をすべて再現する必要はない。人の視覚の基礎は、網膜上に写る2枚の映像であり、人が、ある瞬間に網膜像として得る波面は、全波面のうちの一部である。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。人はその時間的に変化する2枚の映像をもとに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。

したがって、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枚の映像を人間の側に伝達し、それを人間の網膜上に適切な提示装置を用いて正確に時間遅れなく写し出せば、人はロボットのところで直接見たのと同様の網膜像を得ることができる。つまり、それらの映像を用いて、そこで直接見たのと同様の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。

このように、人間の運動計測装置、提示装置およびスレーブロボットからなるシステムを用いて、波面を部分的かつ連続的に取り込むことにより、記録再生装置が現実構成可能な大きさとなり、前述の①の問題点が解決される。

また、テレイグジスタンスの方式では、人の存在する側の環境の視覚情報を遮蔽した状態で、その代りに遠隔のロボットからの視覚情報を提示する。さらに、人の手や体幹の動きも実時間で忠実に測定して、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すので、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ような構成が可能となる。

したがって、従来の(a)のディスプレイの持つ②と③の問題点も解消できることになる。

3. 研究の現状

3.1 基本型テレイグジスタンス

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3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立体ディスプレイは能動立体ディスプレイと呼ばれる。トレイ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。

理想的な視覚提示システムの構成法では、2つのカメラを人の眼間距離に等しく配置する。このカメラを載せた入力機構は人の首の動きにあわせて制御されている。まず、人の目の動きを測定し、それにあわせてカメラと提示用CRTの輻輳角 θ_h と θ_r を $\theta_h = \theta_r$ となるように制御する。それと同時に対象物までの距離 X_r が決定されるのでカメラの焦点をあわせる。提示部においては、CRTの前に配したレンズ系を制御して、CRT像の虚像の位置が $X_h = X_r$ となり、かつ像の大きさが $I_h = I_r$ となるように制御し人間に提示する。

さて、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3つがある。

図1の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。したがって、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_h を常に $X_h = 1m$ 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2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、図1(a)の波面再生方式を一部取り入れ、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。したがって、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に構成原理を示す。

トレイグジスタンスの視聴覚機構は、ロボットの存在する現場の視聴覚情報をオペレータに実時間的に提示する。そのため、オペレータの動作に実時間で追従し、かつ、常にオペレータの正面方向に正しい位置と姿勢を保って視聴覚情報の提示が行えなくてはならない。そのためには、運動視差の効果を直接視と同等に生じさせる必要がある。すなわち、オペレータの運動に伴いロボット側のセンサ部も人間の運動にあわせて制御しつつ、その時得られた映像情報をオペレータに上記の状態を保ちつつ提示する必要がある。

そのための提示機構としては、

- (1) パッシブリンク型
- (2) マスタースレーブ型
- (3) インピーダンス制御型
- (4) 頭部搭載型

の4通りが研究されている。いずれも理想的には空間移動3自由度と回転3自由度の合計6自由度を必要とする。

(1)のパッシブリンク型は、重力バランスをとったリンクに提示装置を取り付け、それを人の頭と固定する。これにより人の自由な運動に対して、いつも上記

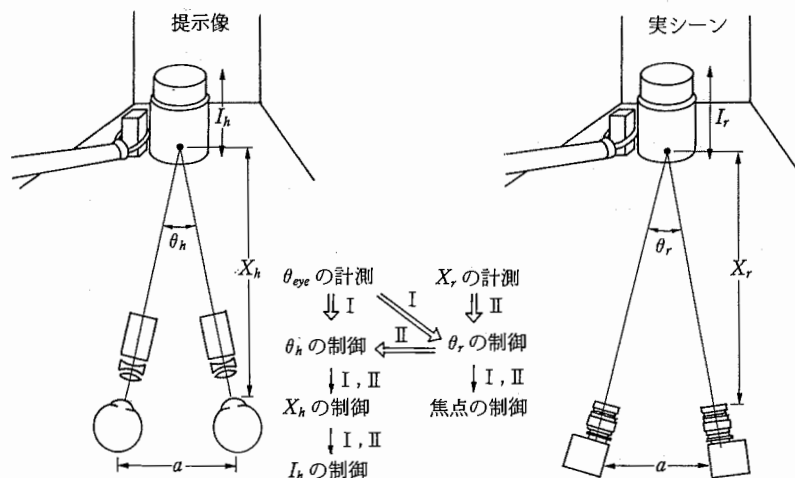


図2 テレイグジスタンス視覚提示システムの設計法

条件下で空間知覚が行えるようにしている。装着感は最も良好であるが、粘性力や慣性力の動的バランスが補償されず残るのが問題である。

(2)のマスタースレーブ型では、人間の運動をゴニオメータ、磁気センサあるいはジャイロなどの装置で測定し、人の前に配した提示装置を人の運動にあわせて制御し上記条件を満足させる。人との接触条件を厳密に考慮しないと、わずかの遅れや軌道のずれにより使いにくさが生じる。

(3)のインピーダンス制御型は、(1)のパッシブリンク型にアクチュエータを加え慣性力や粘性に対する補償を行ったもので、使いやすい。システムが複雑になりコストがかさむのが欠点である。このシステムでは、オペレータはディスプレイの重力を負担せずすみ、また、慣性力も実際の1/3以下に抑えることができるため、装着感の優れた頭部操作が可能となる。

(4)の頭部搭載型では、ディスプレイの軽量化を図り、提示装置全体をヘルメット等に取り付けオペレータが頭にかぶる。運動の計測は磁気センサ等で非拘束に行う。構成は簡単で、自由度は極めて高いが、よほど軽量化しないと重力、慣性力がすべて人間の首への負担となる。

一方、トレイ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。

マニピュレーション作業用のトレイグジスタンスシステムはその一例である⁴⁾。写真1に示すロボットは、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る。このロボットと写真2に示す頭部結合型マスターシステム、ないしは、写真3に示す頭部搭載型ディスプレイとをあわせてトレイグジスタンスシステムを構成する。このシステムを用い、マニピュレーション作業を行って、従来

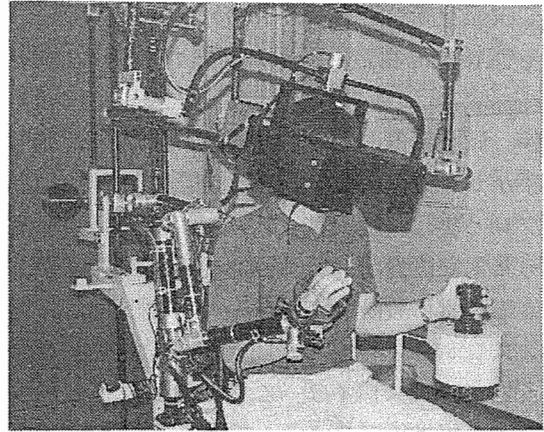


写真2 作業用トレイグジスタンス・マスターシステム

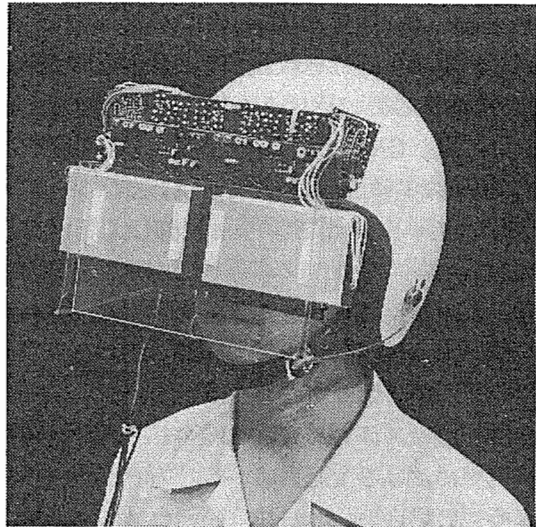


写真3 頭部搭載型臨場感覚提示装置

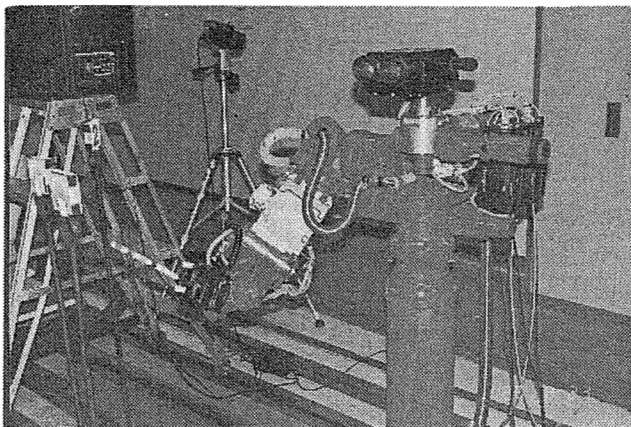


写真1 テレイグジスタンス人間型スレーブロボット

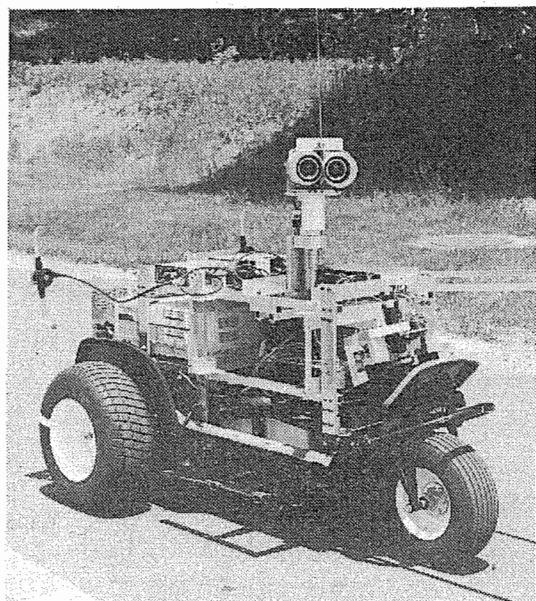


写真4 移動型トレイグジスタンスロボット

の2次元ディスプレイと比較の結果、トレイグジスタンスの優位性が検証されている。

このようなマニピュレータを運ぶことをめざした、移動型トレイグジスタンスシステムも研究されている(写真4)。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。

また、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⁵⁾⁶⁾が行われている。

3.2 拡張型トレイグジスタンス

トレイグジスタンスの基本システムは、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借りて、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った。

そのシステムは、最もベーシックな形では、人間が直接見たり感じたりするままを遠隔のオペレータに伝えることであるが、その拡張として、例えば、人間の体内に入るような小さなロボットの助けを借りれば、自分自身も小さくなったような感覚を持つことができる。

逆に、大型のロボットを利用して大型の作業を自分が巨人になったような感覚で行うことも可能である。

さらに、基本システムでは人間が通常感じる感覚チャンネルのうち、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⁷⁾⁸⁾。すなわち、トレイグジスタンス技術は、人間の感覚の範囲に留まらず、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、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ックスと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いった臨場感をもって見るができる。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、3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。

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。

数秒以上の時間遅れのある状況下でも、トレイグ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、トレイグジスタンスモードではこの送られた指示を解読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。指示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をし直す。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。

3.3 仮想現実

3.2節に述べた擬似臨場感の最も極端なケースとして、コンピュータが作り出した虚構の世界を、あたかも現実の世界であるかのように人間に提示する、いわゆる仮想現実の研究が進められている。

人間は、その仮想環境(Virtual Environment)の中を動きまわったり、仮想環境内の様々な物体を見たりさわったり、それに対して作業したりすることができる。その時の感覚は、理想的には、人間が直接、現実世界で体験するように伝わる⁹⁾。

このような仮想現実の研究は、現在、機械技術研究所(写真5)、東京大学、筑波大学、東京工業大学の他、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、機械が作り出す仮想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アーツや、3次元実時間コンピュータグラフィッ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。

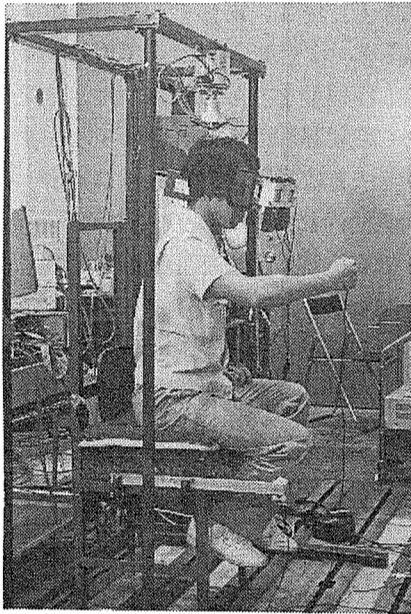


写真5 仮想空間へのテレグジスタンス実験システム

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。人間は物理的の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. 明日のテレグジスタンス

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、組立作業、災害時における捜索、人命救助、復旧作業、通常時においては清掃作業、土木建設作業、農林水産業、医療福祉、警察、探索、レジャー用、テストパイロットやテストドライバの代替など、広範囲の応用が考えられている。

上記のテレグジスタンスの応用は、どちらかといえばロボットないしは機械の能力の足りない部分を人間が補って、人間機械システムとして作業を行うという考え方に立脚するものである。

それに対して、人間の能力を補ったり拡張するためにテレグジスタンスを用いるという立場もあり、こ

れはパーソナルなロボット利用のアプローチである。

例えば、世界各地に多数の支社を有する会社の社長は、それぞれの支社や工場の様子を支社長や工場長からのレポートで受けるだけでは最高の判断を下せない。やはり、それぞれの場所に自分で行って、その状況をつぶさに見たい。しかし、そのためには世界中を旅してまわらなければならない、時間的にも体力的にも無駄が生じる。その場合、テレグジスタンスがすべてを解決する。各工場や支社に自分の分身のロボットを配し、時々、それらのロボットとの通信路を確立して、それを自らの分身として、そのロボットの目で見、耳で聞き、手で作業し、足で移動する。

名医の診断や治療は、なかなか受けにくいものである。しかし、それは何物にもかえがたい貴重なものである。テレグジスタンスを用いれば、簡単に名医を世界中のどこの病院にでも招聘することが可能となる。病院にテレグジスタンスのロボットを用意し、名医のいる病院との通信路を確立し、名医にロボットをテレグジスタンスモードで制御してもらう。その招聘した名医をつれて病院内の大回診を行えば、多数の患者さんが助かるばかりでなく、大回診に同行した医師のレベルアップにもつながり、世界的に医学の水準が飛躍的に向上するであろう。

現実的な体験が得られるというメリットを利用したテレグジスタンスの応用もある。アマゾンの奥地、南極、アフリカの荒野など人は様々な所を探検し、そこから経験を通して多くのことを学ぶ。しかし、それが命と引換えでは、という場合がある。テレグジスタンスによる探検は新しいレジャーとしても使われそうである。

教育という意味では、ドライブの練習や飛行機の練習などのフライトシミュレータとして、高度な実際に近い練習に利用できよう。特に、ドライブでは、事故や故障、あるいは極限的な状況での操作を練習しておくことは、極めて有効ではあるが、ふつうは危険でそのような練習はできない。テレグジスタンスによればそれが可能となる。また、通常のテレグジスタンスにコンピュータによる仮想現実感の方法を加味するならば、様々な形のリアルタイムシミュレータを構成し、あたかも現実のような人工環境の中に人がいるような錯覚を作り出すことができる。

これは、無限の応用の可能性を秘めている。もちろん、ゲームにも利用できる。教育用としては物理学や医学など素粒子の世界や、物体の中などをまるでマイクロ探検隊さながらに冒険してまわりながら体験的に学べる。

もうひとつ、全く別の考え方の応用もある。将来、社会には危険な仕事、退屈な仕事、あるいは非衛生的なことは、ロボットや機械にまかせ、人間はより人間らしい創造的な仕事に従事することになる。しかし、人間は、お仕着せをきらう。そもそも、このようなことは人がやるべき仕事ではないなどと誰が断言できるだろうか。人は、自分のやりたいことを、人の迷惑にならぬ範囲で（実はこれは大変むずかしい問題を含んでいるが）できなくてはならない。したがって、ふつうはロボットのやることを人がやりたい場合どうするかが問題となる。実際に、機械やロボットと同じ場所で働くのは極めて危険で、しかも事故が起きれば社会機能もストップしかねないし、したがって、そのようなことは自由の範囲を越えるかもしれない。

ここでもトレイグジスタンスがその解決を与える。すなわち、ロボットや機械にまじって作業をしたいという人の要望を、安全性や社会性に反しない形で満足させることができる方法であるからである。

5. む す び

トレイグジスタンスなどの人工現実感に対する内外の関心が高まっている。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」の研究開発計画のひと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組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) と呼ばれ、近年 NASA を中心として盛んになっている。

また、人工現実感 (Artificial Reality) や、仮想現実 (Virtual Reality) 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ひとつと看做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、是非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さける必要があると考える。

さて、トレイグジスタンスは、人間の認知的制御機能を人間ロボットシステムにより最大限ロボットに發揮させ、従来は人間にしかできなかった作業をロボットでも可能にすることを目標にするとともに、ロボッ

トの能力をサイバネティックに人間と結合させ、機械でも人間でも不可能であった作業までも遂行可能にすることを目指している。したがって、トレイグジスタンスは、汚い、きつい、危険など、いわゆる3Kと呼ばれる労働をロボットで代替することを可能とするための切札として期待されている。

一方、トレイグジスタンスは、人間の太古からの夢のひとつである自己の能力を最大限發揮して、自らを、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。

米国では、ワシントン大学を中心としたコンソーシアムの設立計画、プレゼンスという名の学術誌の MIT Press からの発刊、MIT、VPL、ノースカロライナ大学、ワシントン大学を結ぶバーチャルネットの構想など、新しい方向に向かって加速している。我が国においても、イメージラボラトリーの設立、人工現実感とトレイグジスタンス委員会の発足など、国や企業の関心が急速に高まっている。そのような背景のなか、トレイグジスタンスと人工現実感は今後ますますその応用の領域をひろげていくであろう。

(1990年12月26日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 舘 暉：“トレイグジスタンス—未来の夢と現在の技術—”，日本ロボット学会誌，4，3，pp. 295-300 (1986)
- 2) 舘 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，pp. 167-168 (1982)
- 3) 舘 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，pp. 314-326 (1989)
- 4) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: “Development of Anthropomorphic Tele-existence Slave Robot”, Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 385-390, Tokyo, Japan (1989)
- 5) 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)
- 6) 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), pp. 563-573, Versailles, France (Oct. 1987)
- 7) S. Tachi and T. Sakaki: “Impedance Controlled Master Slave System for Tele-existence Manipulation”, Proceedings of the First International Symposium 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. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 719-724, Tokyo, Japan (1988)
- 9) S. S. Fisher, et al.: “Virtual Environment Display Systems”, ACM 1986 Workshop on Interactive 3 D Graphics,

Chapel Hill, North Carolina, pp. 1-11 (1986)

- 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，東京，pp. 201-206 (1988)
- 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, pp. 49-52 (1990)
- 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ーフェース”，テレビ誌，44, 8, pp. 981-985 (1990)
- 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, pp. 27-35 (1990)



たち
館
すすむ
障 昭和48年，東京大学大学院博士課程修了。同年，同大学助手，50年，通産省機械技術研究所研究員，主任研究官，バイオリボティクス課長，米国MIT客員研究員などを経て，現在，東京大学先端科学技術研究センター助教授。盲導犬ロボット，テレインジスタンスなどの研究に従事。工学博士。