

《解説》

テレイグジスタンス

たち
館すむ
暁*

1. はじめに

近年、人工現実感 (artificial reality) あるいは、テレイグジスタンス (tele-existence) という概念が生まれ、その技術が急速に実用化されようとしている¹⁾⁻¹³⁾。たとえば、人間の動作をコンピュータに入力したり、コンピュータグラフィックス画面の中に自分が入りこんだような感覚を作り出すことが可能になりつつある。また、遠隔に配したロボットの存在するところで、直接作業するような実時間臨場感をもって、ロボットを自在に制御する技術も熟しつつある。

人工現実感を用いれば、まだできていない製品を手で触ったり、設計中の家の中を歩き回ったり、分子を手で組み合わせるといった今まで考えられなかった新しい世界が開けると期待されている。テレイグジスタンスを用いれば、従来は人間の直接作業によらなければ不可能だった危険な作業や苛酷な作業をロボットに代替させることが可能となるほか、人間がいながらにして自分の行きたい環境に自由に存在しさまざまな体験をすることができるようになる。

一方、人工現実感とテレイグジスタンスの実現には、計測制御技術、エレクトロニクス、通信、情報処理、メカトロニクスなどの技術を背景に、ロボット工学、コンピュータ工学、3次元画像工学、ニューロコンピューティング、生体生理工学、心理物理学、認知科学などの成果を融合させ駆使することが緊要であり、今後のより一層の活発な研究開発が期待されている。

本解説では、このテレイグジスタンスの考え方を整理し将来の応用の方向を探るとともに、現在の研究の現状を著者らの研究を中心として紹介する。

2. 人工現実感とテレイグジスタンスの進展

人工現実感とは、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もって体験し、かつその仮想世界で行動することを可能とする新しい技術である。一方、テレイグジスタンスとは、人間が従来の時空の制約から開放され、時間と空間ないしはそれらの両者を隔てた仮想環境に存在することを目指す新しい概念であって、人工現実感を別の観点からいい表わしている。

では、今なぜ人工現実感ないしはテレイグジスタンスが世界中で注目されているのか。その1つに今までとはまったく別の分野とされていた多くの重要な領域での関心が人工現実感の概念で統合しうる1つの目標を目指して進展していることが挙げられる。図1は、その現状を示している。ロボットの遠隔制御の分野では、第2次世界大戦後の原子力技術の進展および義手などの身障者用補装具と関連して生じたテレオペレーション技術が70年代になってロボット技術を加味して管理制御に進展し、80年代にはテレロボティクスと呼ばれるに至った。さらに、80年代からは、高度な実時間臨場感を求めたテレイグジスタンス (テレプレゼンス) を用いる遠隔臨場制御の新しい概念が生まれ急速に発展してきた。この流れは、ロボットの生み出す人工現実感の世界へと着実に向かっている。

コンピュータグラフィックス (CG) の分野においてもソリッドモデルにパースペクティブ変換を施し陰影をつけて提示する従来の2.5次元の世界から立体視可能な3次元へ進み、さらに、人間の視点により変化してホログラフィーのように回り込んで観察することもできるインタラクティブな3次元へと進展してきている。現在の実時間インタラクティブな3次元CGは人工現実感に限りなく近づこうとしている。

CADの分野でも、上記のCGに触覚や力感覚のフィードバックを加え、仮想製品による設計支援や評

* 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

キーワード: テレイグジスタンス (tele-existence), テレプレゼンス (telepresence), 人工現実感 (artificial reality), 仮想現実感 (virtual reality).

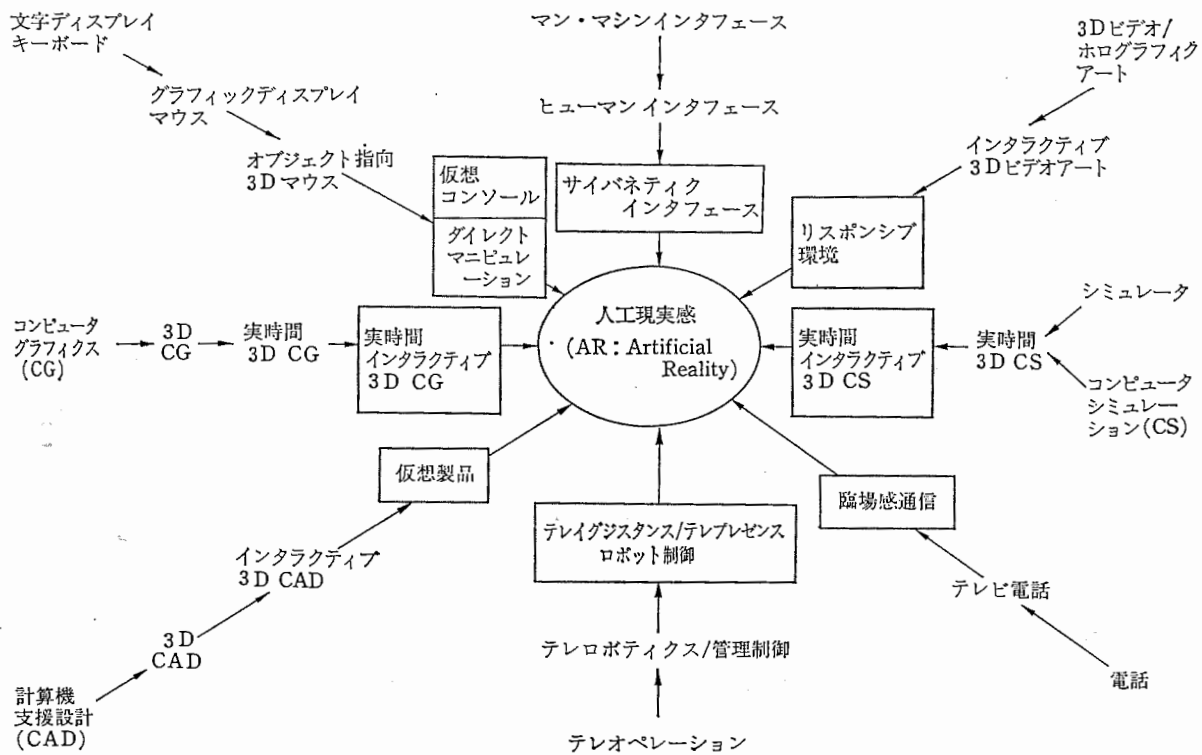


図1 人工現実感とテレプレゼンスの進展

価を模索し始めている。仮想製品を用いれば、実際に製品を作る前に十分に使用感を評価して、それによって自由に設計変更が可能であり、変更したデータは計算機に蓄えられているので CIM とつなげばそのまま実際の製品を製作できる。人間にとって真に使いやすい製品あるいは、将来必要性の増すとされる個人個人の適性や個性に合った製品などへの応用を求めてこの分野でも人工現実感が求められ始めている。

コンピュータの分野でも、人間にとって使いやすいインタフェースが追及されている。従来のキーボードと文字による表示から、アイコンなどのグラフィックスによる表示とマウスによる入力へと進展し、さらに、オブジェクト指向や3Dマウスをへて、仮想コンソールによる入出力やダイレクトマニピュレーションによる入力などが提唱され始めている。このように、コンピュータと人間のインタフェースも人工現実感を1つのターゲットとしている。

通信の分野でも同様で、電話がテレビ電話となり、さらに臨場感を増した臨場感通信が将来の ISDN 時代を睨んで真剣に研究されている。

シミュレーションの分野でも、実時間かつ実体験に近い実時間インタラクティブな3Dのコンピュータシミュレーションが急速に進展している。

芸術やアミューズメントの分野でも、いままでの芸術表現を超えた新しい芸術のメディアとしての人工現

実感が盛んになっている。

すなわち今までは、人間と機械のインタフェースにおいて、人間の柔軟性に頼って人間の方が機械にあわせていた。そのような従来のマンマシンインタフェースの考え方から、最近になって機械を人に優しくするヒューマンインタフェースの考え方が提唱され進展してきている。そのつぎの段階として、あくまでも人間を中心として人間の自然な感覚に機械のほうから無限に歩み寄るいわゆるサイバネティックインタフェースの新しい概念が生まれ始め、その究極として人工現実感があると考えられる。一方、コンピュータやセンサなどの技術が急速に進展し、また人間科学の進展による人間感覚などの知見の蓄積が進み、いままでは非現実的な夢と思われていた人工現実感の考え方が現実味を急速に増してきた。そこでいままでは、独立に進展してきた多くの分野が人工現実感とテレプレゼンスを注目し21世紀へのキーテクノロジーとして認識し始めたのである。それにともない、各分野に関連する企業においても人工現実感やテレプレゼンスの研究開発が精力的に繰り広げられるようになった。

しかも、単にこれらの分野で共通の概念が育ってきただけではなく、人工現実感ないしはテレプレゼンスには第4章で述べる分野共通の基礎技術があり、1つの分野で開発された基礎技術が他の分野にもそのまま利用できるもので、それらをまとめて1つの技術体

系として研究することも重要となっている。そこで、内外の学界でもこの人工現実感を重要な研究分野として認識し盛んに研究が進められている。

3. 実世界と仮想世界へのテレイグジスタンス

この人工現実感ないしはテレイグジスタンスを大別すると、ロボットを媒体として、人間が現在存在しているのとは別に存在する実世界 (real world) へのテレイグジスタンスと、コンピュータなどの創製した実際に存在しないが、きわめて現実感溢れる仮想世界 (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現実 (tele-reality) と呼ばれ、後者は狭い意味での仮想現実 (virtual reality) と称されることもあるが、一般的には、厳密な区別なく用いられることが多い。図 2 にテレイグジスタンスを上記の観点から分類して示す。

3.1 実世界へのテレイグジスタンス

ロボットを利用した実世界へのテレイグジスタンスは、さらに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狙っている。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グジスタンスである。たとえば、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きにおける拡張である。

また、標準型テレイグジスタンス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。すなわち、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) をも積極的に利用する。たとえば、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ような臨場感をもって見ることができ。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 次元的な重合せである。たとえば、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。Anderson ら

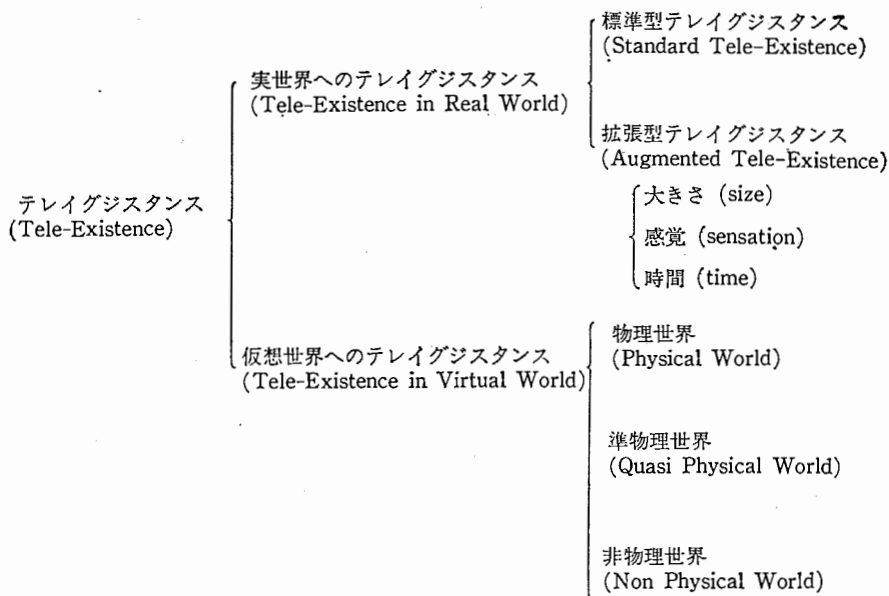


図 2 実世界と仮想世界へのテレイグジスタンス

は、伝送ブロックを損失のない伝送ラインに変換し、みかけ上時間遅れに依存しない受動的な素子にみなせるようにすることで、最大2秒程度まで安定性が保てる方法を提案している。しかし、これ以上は直接制御できない。

そのような場合でも、拡張型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、理論的にはつぎ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なおす。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。

3.2 仮想世界へのトレイグジスタンス

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、今われわれ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、通常の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、準物理世界は、われわれの住む宇宙の法則は働くが、たとえば、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、まったく未知な世界を体験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とき、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い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。非物理世界は技術的には他の2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超えた、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

ての可能性をも秘めており、その意味でも着目されている。

3.3 テレイグジスタンスの応用分野

人工現実感ないしはトレイグジスタンスをあえて一言でいえば、人間の空間的制約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。

そのような観点でトレイグジスタンスの使われる目的を整理するとつぎのようになる。

- (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) テレマシーニングなど新しい生産支援手段としての第2次産業製造業分野
- (3) テレファーマーなど農林水産業などの第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など医療分野での活用
- (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) サイエントフィ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など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超えた新しい思考や感性の表現方法の提供

4. テレイグジスタンスの構成と課題

図3にトレイグジスタンスの構成を示す。人工現実感ないしは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、(2)人間がそのなかで自由に行動でき、しかも(3)その仮想環境との相互作用が自然な形で実時間に生じることである。そのようなトレイグジスタンスの実現のための基礎技術として、(i)人間の状態推定(運動状態や音声などの外部状態と脳波や心電などの内部状態を含む)と人間の行

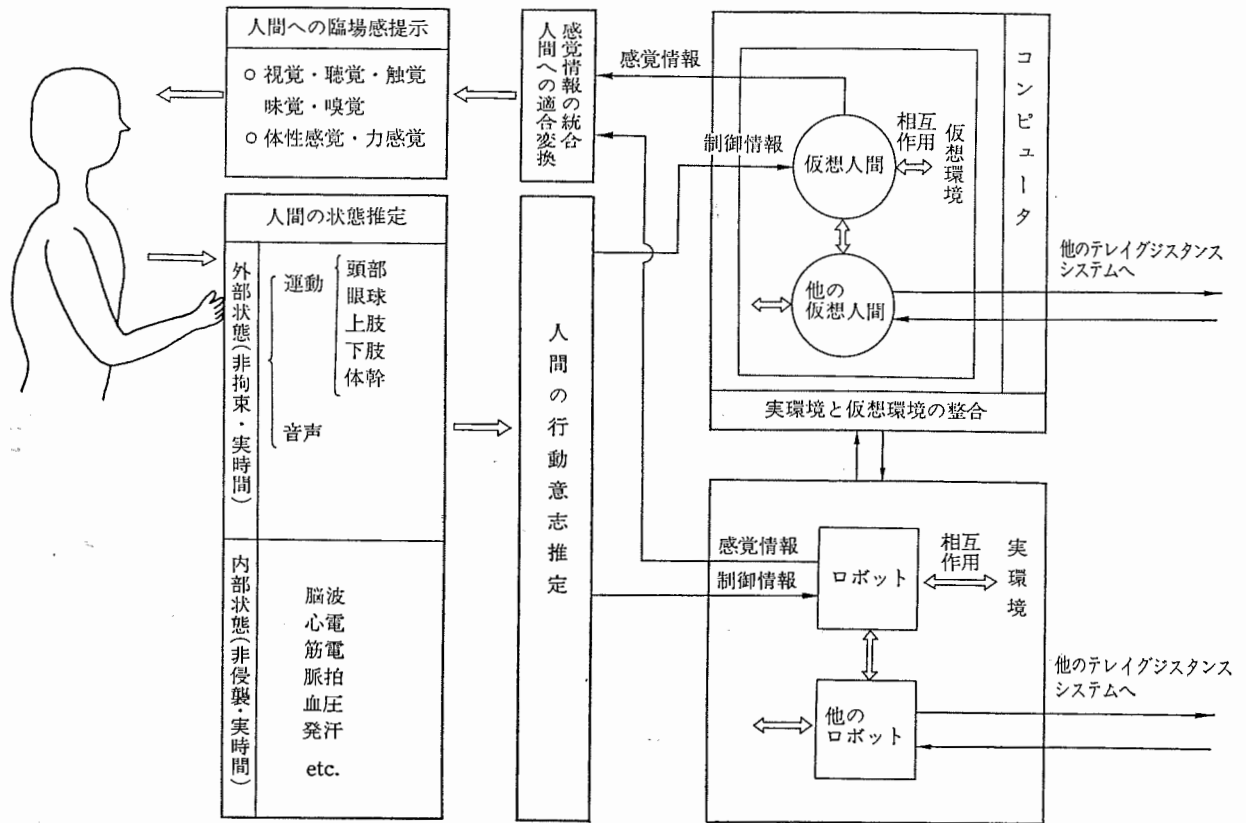


図 3 テレイグジスタンスのシステム構成

動意志推定、(ii)仮想環境あるいは実環境のなかでの仮想人間あるいはロボットの人間の行動意志に基づく自在な制御とそれに伴う自然な環境との相互作用、および(iii)その過程や結果の情報の使用者たる人間への臨場のかつ実時間での提示、といった共通かつ基礎的な基盤技術が存在する。そして、それらの追及がそのままトレイグジスタンスの将来の課題でもあり、1つの分野で研究開発された成果はその分野に限らず他の分野においても共通に広く利用できるという特徴を有している。

また、人工現実感を単にシミュレーションに終らせないためには、仮想環境と実環境を整合性よく結ぶことが重要であり、この整合技術はこれからの興味深い課題の1つである。

さらに、同一仮想環境内や実環境内に他のトレイグジスタンスシステムからの仮想人間やロボットが共存するシステムが模索されるわけで、そこに環境とロボットに加えて、ロボット間ないしは仮想人間どうしの新しい相互作用が生じる。これも、新しく面白い研究要素である。

5. テレイグジスタンス研究開発の現状

仮想世界へのトレイグジスタンスについては本特集

の他の解説で詳しくなされているので、ここではロボットを用いる実世界へのトレイグジスタンスに絞って、特に著者らの研究を中心に現状を紹介する。

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人力機構は人に首の動きにあわせ制御されている。まず、人の目の動きを測定し、それにあわせカメラと提示用CRTの輻輳用 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。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。

つぎに、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 $X_h = 1$ [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、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。

一方、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。

写真1に示すマニピュレーション作業用のレイ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と、写真2に示すレイグジスタンスマスター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、レイグジスタンス方式の優位性が検証されている⁶⁾。写真3は、レイグジスタンスによる花束贈呈の実験風景を示している。これは目と手の協調動作が特別の訓練することなしにだれでもすぐにレイグジスタンスシステムにより可能であることを示しつつ、人間との共存の場での利用の可能性をも示すデモンストレーションとなっている。

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

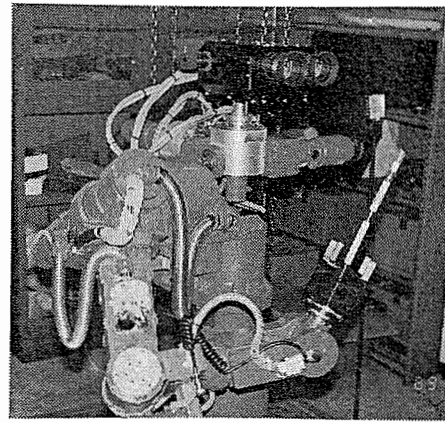


写真1 テレイグジスタンススレーブロボット

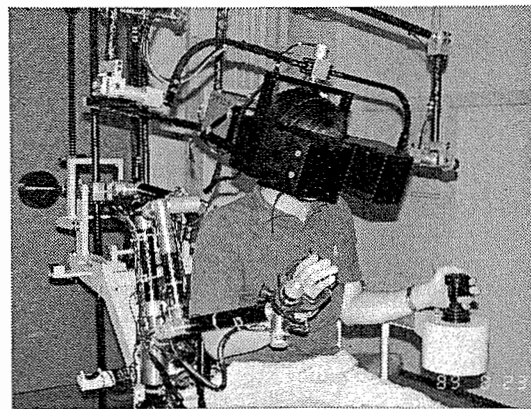


写真2 テレイグジスタンスマスター装置

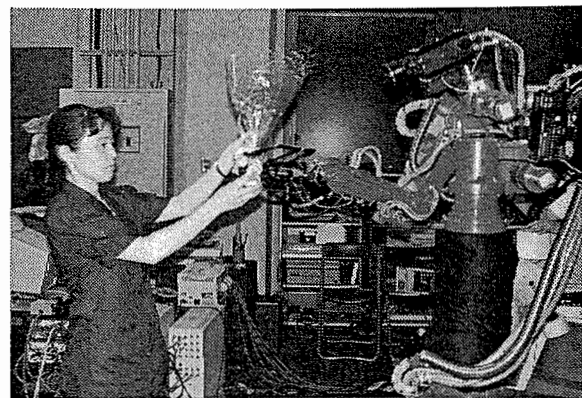


写真3 テレイグジスタンスによる人間との共同作業

Teleoperated Robot を用いたテレプレゼンスの研究が行われている⁵⁾。

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始されている。

6. おわりに

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急速に高まっている。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わが国独

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1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1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、テ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発揮させ、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、テレイグジスタンスは、汚い、厳しい、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。

一方テレイグジスタンスは、人間の太古からの夢の1つである自己の能力を最大限発揮して自らを、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も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、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いる。

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。わが国においても、イメージラボラトリーの設立、人工現実感とテレイグジスタンス研究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、テ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ゆくであろう。

(1991年4月22日受付)

参考文献

- 1) 館, 阿部: テ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, 167/168 (1982)
- 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-IToMM, Udine, Italy (1984)
- 3) 館, 荒井: テ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, 314/326 (1989)
- 4) 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)
- 5) J. D. Hightower, E. H. Spain et al.: Telepresence: A Hybrid Approach to High-Performance Robots, Proceedings of the '87 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 563/573, Versailles, France (1987)
- 6) 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)
- 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 (1990)
- 8) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-existence Simulator with Artificial Reality, Proc. of IEEE International Work Shop on Intelligent Robots and Systems, 719/724, Tokyo, Japan (1988)
- 9) S. S. Fisher et al.: Virtual Environment Display Systems, ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, North Carolina, 1/11 (1986)
- 10) 廣瀬, 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, 201/206 (1988)
- 11) 岩田: 大規模仮想空間を歩行するための人工現実感, Human Interface, 5, 49/52 (1990)
- 12) 竹村, 岸野: 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, 981/985 (1990)
- 13) 佐藤, 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, 27/35 (1990)

[著者紹介]

たち
館

すむ
障 君 (正会員)

昭和21年1月1日生。昭和43年東京大学工学部計数工学科卒業。48年同大学大学院工学系研究科博士課程修了, 工学博士。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, 遠隔制御課長, バイオロボティクス課長を経て, 平成元年より東京大学先端科学技術研究センター助教授, 現在に至る。1979年から1980年米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 客員研究員。パイクスペクトルを用いる信号処理, 盲導犬ロボット, テレイグジスタンスなどの研究を行う。IEEE/EMBS 学会賞, 通産産業大臣賞研究業務優秀者表彰などを受賞。現在, IMEKO TC17 (Robotics) 議長。本会フェロー。

