

《解説》

テレロボティクスとテレイグジスタンス

たち
館すすむ
障*

1. はじめに

遠隔のロボットと人間とからなるシステムにおける、機構・制御・情報・システム・ヒューマンインタフェースなどのロボティクスの諸問題を扱う科学技術を、テレロボティクス (telerobotics) と呼んでいる。

本解説では、宇宙用のテレロボティクスシステムの世界の研究開発動向を実際プロジェクトを中心として展望する。また、テレロボティクスの中で現在注目されているトピックスとして、ロボットの存在する場所にいるような実時間臨場感をオペレータが利用してロボットを自在に制御するテレイグジスタンス (tele-existence)/テレプレゼンス (telepresence) 技術と、人間に計算機により構成された擬似空間を臨場的に提示して、その仮想空間内での作業を行うことを可能とする人工現実感について紹介する。

2. 宇宙用テレロボティクスシステム

テレオペレーションにロボティクスを加味した、いわゆるテレロボティクスの考え方が明確な形で表われたのは、ARAMISの報告書からである。NASA (National Aeronautics and Space Administration) のMSFC (Marshall Space Flight Center) は、MIT (Massachusetts Institute of Technology) の人工知能研究所に1981年から1983年にかけて宇宙での自動化、ロボット化、および人工知能化の検討を委託した。その結果は、「Space Application of Automation, Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)」として提出された。この報告書では、本格的な宇宙ロボットの検討、および技術アセスメントがなされた。とりわけ、1983年に提出された

Phase II の報告の中で提案されたテレプレゼンスの考え方が重要である¹⁾。

その後、NASA が米国議会の支持を受け、宇宙ステーションをはじめとする宇宙の自動化・ロボット化技術を検討する ATAC (Advanced Technology Advisory Committee) が開設され、テレロボティクスなる言葉が生まれた。この委員会は、宇宙ステーション開発資金の少なくとも10% (2,000億円相当) を宇宙自動化、ロボット化に利用すべきだとした点できわめて重要である。

米国の NASA におけるテレロボティクス関連の研究は3つに大別できる。第1は、OAST (Office of Aeronautics and Space Technology) による Telerobotics Research Program であり、Code R と呼ばれている研究開発が主体となる。

第2は、OSS (Office of Space Station) による Flight Telerobotic Servicer Engineering Development Program で Code S と呼ばれる。FFS (Flight Telerobotic Servicer) とは、OMV (Orbital Maneuvering Vehicle) などの先端に取り付ける汎用のエンドイフェクタであり、NASA の GSFC (Goddard Space Flight Center) の主導のもとで開発されている。

第3の活動は、NASA のオフィスやセンターによるスペースシャトル、惑星探査船などテレロボティクスの設計に関する研究や技術アセスメントを行う分野である。

図1は、NASA の Montemerlo により提案されたテレロボティクスシステムの構成図である²⁾。氏は、テレロボティクスシステム開発のための基本要素研究となる中核技術として、つぎの5つの研究が重要であるとしている。すなわち、

- A) 知覚と認識 (視覚, 触覚, 力覚, 近接覚)
- B) 作業計画と推論 (知的監視, 作業計画, オペレーション, 診断)
- C) 制御・実行 (人間・機械共同作業, 先端コンピ

* 機械技術研究所 つくば市並木1-2

* 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: テレロボティクス (telerobotics), 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), 仮想環境提示 (virtual environment display).

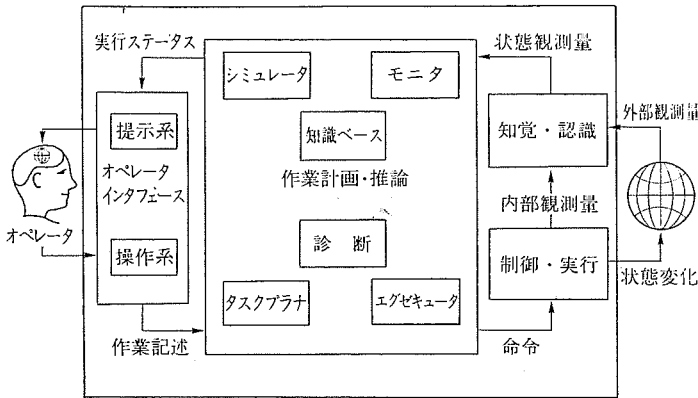


図1 テレロボティクスシステムの構成

コンピュータ技術とセンサベース制御技術によるテレオペレータ機能の拡張、自律制御)

D) オペレータインタフェース (管理制御, テレプレゼンス)

E) システムアーキテクチャと総合化

それぞれの中核技術について, JPL, MIT などでの研究が進められている。また, 具体的なテレロボットについては, 米国の民間会社と NASA により共同提案が数多くなされている。たとえば, マーチン・マリエッタ社の TWS (Telrobotic Work Station)³⁾, EVA (Extra Vehicular Activity) の代替をめざすグラマン社の SAM (Surrogate Astronaut Machine)³⁾, ORU (Orbital Replacement Unit) などを宇宙ステーションから OMV まで運ぶ自由飛行搬送ロボット ROBIN のためのロックウェル社のテレプレゼンスキット⁴⁾などがあげられる。

3. オペレータインタフェース技術

2. で述べたように広義のスペーステレロボティクスの研究は実際の宇宙用ロボットシステムの開発研究と中核技術の基礎研究からなる。後者については宇宙ロボティクス, 特に自律ロボットの要素技術とかなりの部分でオーバーラップしている。その中で狭義のテレロボティクスともいうべき研究要素がオペレータインタフェースである。オペレータインタフェースは, 宇宙ロボットに指令を与え, その指令に基づくロボットの作業を監視し, 必要に応じてロボットに再指令を与えたり, ロボットの働く環境や対象に関する知識を与えたり, また, ロボットが知識を獲得するのを補助したり, さらに, ロボットを用いながらロボットに代わって人間が直接作業しているかのような臨場感を有してオペレータが作業を行ったりするために用いられる。

図2に, 宇宙ロボット開発動向調査分科会で概念設計を行っているオペレータインタフェースの概念図を示す⁵⁾。

オペレータインタフェースは, テレグジスタンス・コックピットと自律系使役インタフェースとに大別される。自律系使役インタフェースは, ロボットに指令を与え, その指令に基づくロボットの作業を監視し, 必要に応じて, ロボットに再指令を与えたり, ロボットの働く環境や対象に関する知識を与えたり, また, ロボットが知識を獲得するのを補助するために用

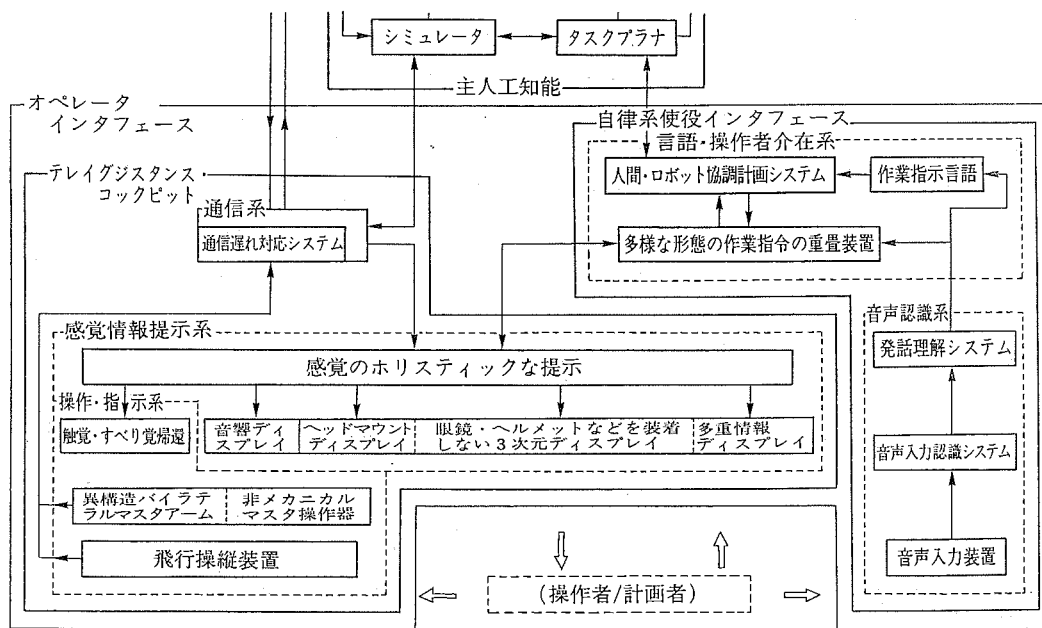


図2 オペレータインタフェースの概念設計の例

いられる。

自律系使役インタフェースは、音声認識系と言語・操作者介入系とからなっており、それらは音声入力装置、音声入力認識システム、発話理解システム、作業指示言語、人間/ロボット協調計画システムおよび多様な形態の作業指令の重畳装置などの研究要素を含む。

一方、テレグジスタンス・コックピットは、オペレータがロボットの作業状況やロボットの内部状態、環境などを監視したり、オペレータが直接作業用ロボットを用いて作業を行う際に、オペレータにロボットが存在する場所で直接作業を行っているような臨場感を与えることを可能とするためのシステムである。

テレグジスタンス・コックピットは、操作・指示系、感覚情報提示系、通信系よりなっており、それらは、異構造バイラテラルアーム、非メカニカル操作器、飛行操縦装置、触覚・すべり覚帰還、音響ディスプレイ、ヘッドマウントディスプレイ、眼鏡・ヘルメットなどを装着しない3次元ディスプレイ、多重情報ディスプレイ、感覚のホリスティックな提示システム、通信遅れ対応システムなどの要素技術を今後の研究開発課題として含む。

4. テレグジスタンス/テレプレゼンス

4.1 テレグジスタンスの概念

離れたところにいる人間（操作者）が、ロボットの存在す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、ロボットを遠隔制御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わかる。また必要なとき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もちながら実行できる。こうした自分の分身をもったような高度の遠隔制御技術をテレグジスタンス（遠隔臨場制御）と呼んでいる。米国では、前述のように1983年の宇宙開発に関連したMITの報告書の中で、テレプレゼンスなる言葉が初めて用いられたが、日本では、1980年からそれとは独立にテレグジスタンスの概念が提案されて⁶⁾基礎研究が始められており⁸⁾大型プロジェクト「極限作業ロボット」提案の基礎となった。

さて、テレグジスタンスでは、まず人間形のロボットを遠隔に配し、人間とロボット

の間の情報伝達の通信路を確立する。つぎにオペレータの運動や力の状態などが実時間で計測され、内部状態が推定される。その内部状態が通信路を介して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、それより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。そのときのロボットの人工の感覚器からの情報は、逆にすべて通信路を介して人間に送られ、オペレータの側に置かれた提示装置を用いて人間の感覚器に提示される。

したがって、視覚を例にとって説明すると、オペレータが見たい方向を向けば、ロボットも同一の方向を向いて、そこに人がいたとき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。オペレータが自分の腕を目の前にもつてくると、オペレータの視野内にはロボットの腕が自分の腕の代わりにまった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とらえて作業ができる。ロボットが物体にふれた感覚は、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と似た感覚をもって作業できる。

テレグジスタンスの臨場的な提示の具体的な構成法を、視覚を例にとって説明する。

図3(a)に示すように波面の忠実な再構成を行うには、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。しかしこの方法は、記録・再生の装置が実物大の環境再構成を狙うと非常

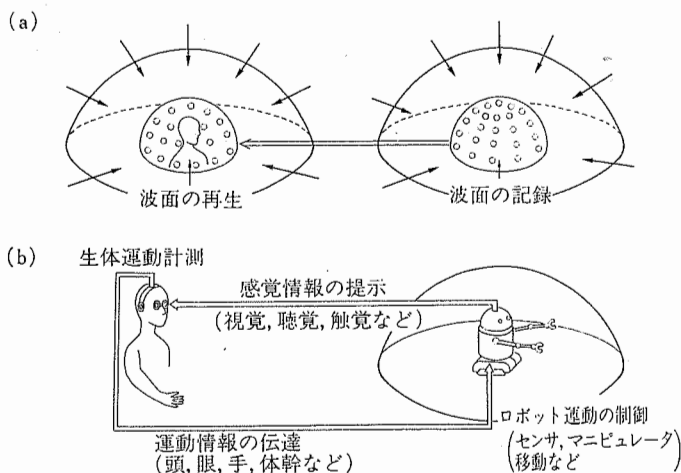


図3 (a) 波面の記録と再生, (b) テレグジスタンスにおける臨場感覚提示法

に大きなものになってしまい、実際にはこのままでは実現できない。

テレグジスタンスの方法では、図3(b)に示すように、ロボット技術と人間の感覚構造に基づいて、実際に実現可能なシステムとして構成している。

人の視覚の基礎は、網膜上に写る2枚の映像である。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。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、そのときロボットの視覚入力装置に写した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様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。

4.2 研究の現状

通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」の一環として、昭和58年度から機械技術研究所バイオロボティクス研究室において研究開発が進められている。研究開発は、平成2年度までの8年計画であり、テレグジスタンスシステム設計法を確立し、種々の応用システム設計の基礎データを得ることを目的としている。

現在までに、視覚提示システムの設計法の研究を中心とした研究⁹⁾が進められる一方、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4(a)に移動型テレグジスタンス実験ロボットを示す。このロボットと図4(b)に示す臨場感覚提示装置を用いて、遠隔のオペレータは、障害物のある通路でも、あたかも自分で車を運転しているような感覚で回避制御できることが実際の操縦実験で確認された。また、従来の平面的なスクリーンによる提示と比べテレグジスタンスによる提示方法の優位性が、目的地に到着するまでの必要時間や、障害物との接触の有無などの比較から実証されている¹⁰⁾。

また、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が研究試作され実験が行われている(図5)。右側に示すロボットは、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。左側に示す装置は、頭部搭載型の3次元カラーディスプレイで、オペレータの頭部運動を磁気センサーで実時間計測し、スレーブロボットの頭部運動を

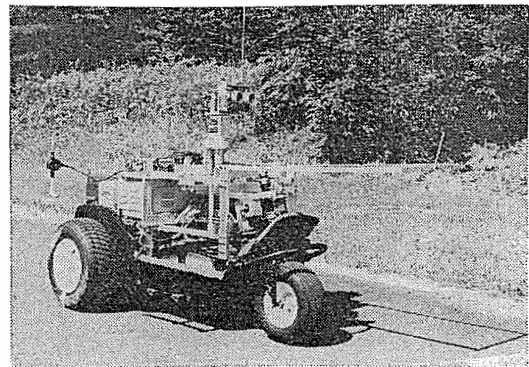


図4 (a) 移動型テレグジスタンスロボット

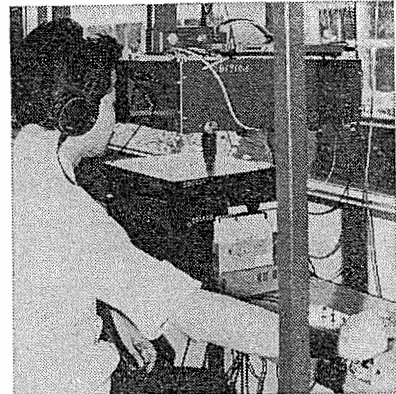


図4 (b) 視聴覚の能動立体ディスプレイ

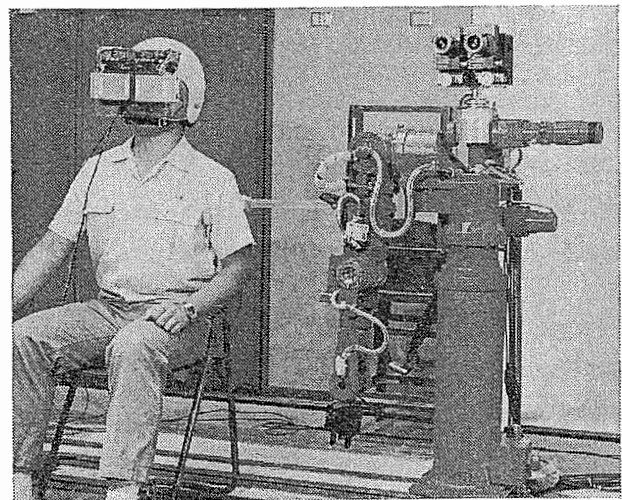


図5 人間型作業用テレグジスタンスロボット(右)と頭部搭載型ディスプレイ(左)

オペレータに追従させ、ロボットの見た情景を実時間臨場感を与えつつオペレータに提示している¹¹⁾。

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が行われている¹²⁾。

5. 人間能力の拡張と人工現実感

5.1 拡張型テレグジスタンス

テレ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、たと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もつことができる。

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¹³⁾。

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。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。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。

時間的な拡張も考えられる。たとえば、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場合がある。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¹⁴⁾。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、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、ロボットは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仕直す。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。

5.2 人工現実感

このような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、いわゆる人工現実感 (artificial reality) 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、仮想環境内のさまざま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。そのときの感覚は、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。

このような人工現実感の研究は、現在、NASAのエイムズ研究センターで進められている¹⁵⁾。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ズーツや、3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コックピットなどへの利用が考えられている。図6にNASAの提案する仮想

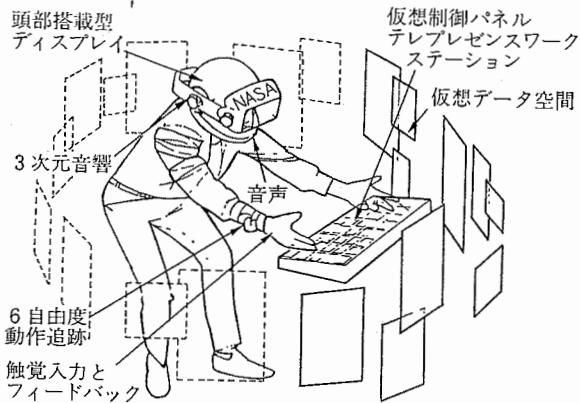


図6 仮想ターミナルの概念

ターミナルの概念図を示す。なお、東京大学においても、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¹⁶⁾。

6. おわりに

トレイグジスタンスには、大別してつぎに示す3つのシステムがあり、それぞれ宇宙ロボットでの広範な利用が可能である。

(1) 基本的なトレイグジスタンスシステム

遠隔のロボットの得た感覚情報を実時間臨場感をもって人間に提示する。人がその場において直接経験したり作業するのと同等の効果を得ることが目標となる。

(2) 拡張型トレイグジスタンスシステム

ロボットのセンサ情報や内部状態などを人間にわかりやすく3次元的に提示したり、大型のロボットや逆にマイクロロボットなどを、オペレータが大きくなり小くなったような感覚を伝えつつ制御する技術。さらに、惑星など時間遅れの無視できない環境下での利用も考えられる。モデルの利用技術や3次元グラフィクス技術が駆使されなくてはならない。

(3) 人工現実感提示技術

体験的シミュレーションを実現する技術で仮想環境をロボットやコンピュータが作り出し、かつ人間がその環境内で環境からの現実感溢れる感覚フィードバックを受けつつ、自由に行動できるようにすることが目標となる。

(1989年9月22日受付)

参考文献

- 1) D. L. Akin and M. L. Minsky et al.: Space Application of Automation, Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)-Phase II, NASA Contract Report 3734 (1983)
- 2) M. D. Montemerlo: NASA's Automation and Robotics Technology Development Program, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 979/986, San Francisco. (1986)
- 3) L. Jenkins: Space Telerobotic Systems, Application and Concepts, Proc. NASA Workshop on Space Telerobotics, 29/34, Pasadena (1987)
- 4) M. A. Bronez et al.: Requirements Development for a Free-Flying Robot - the "ROBOIN" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 667/672, San Francisco (1986)
- 5) 小野, 町田, ほか: 宇宙ロボット開発動向調査報告書, 日本機械工業連合会 (1989)
- 6) 館, 谷江, 小森谷: 盲人用歩行補助器評価装置, 特許第1462696号 (1980)
- 7) 館, 谷江, 小森谷: 感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方式, 特許第1458263号 (1981)
- 8) 館, 阿部: テレイグジスタンスの研究第1報, 第21回SICE 学術講演会予稿集, 167/168 (1982)
- 9) 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)
- 10) S. Tachi, H. Arai, I. Morimoto and G. Seet: Feasibility Experiments on a Mobile Tele-Existence System, Proc. the 19th ISIR, 625/636, Sydney (1988)
- 11) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Development of Anthropomorphic Tele-Existence Slave Robot, Proc. Int. Conf. on Advanced Mechatronics, Tokyo (1989)
- 12) J. D. Hightower, E. H. Spain et al.: Telepresence, A Hybrid Approach to High-Performance Robots, Proc. '87 Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR), 56 3/573, Versailles (1987)
- 13) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-Existence Simulator with Artificial Reality, Proc. of IEEE Int. Work Shop on Intelligent Robots and Systems (IROS), 719/724 (1988)
- 14) R. J. Anderson and M. W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators, IEEE Trans. on Automatic Control, AC 34-5, 409/501 (1989)
- 15) S. S. Fisher et al.: Virtual Environment Display Systems, ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, 1/11, Chapel Hill, North Carolina (1986)
- 16) 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ーンインタフェース, ヒューマンインタフェース・シンポジウム論文誌, 東京, 201/206 (1988)