



ロボットにおける3次元可視化技術:テレイグジスタンス*

館 障**

Tele-Existence : Real-Time Three Dimensional Visualization Using Robots

Susumu TACHI

1. はじめに

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持って、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、すなわち遠隔臨場制御技術は、テレイグジスタンス(tele-existence)ないしはテレプレゼンス(tele-presence)と呼ばれている。

本解説では、この遠隔制御の新しい概念であり、ロボットにおける3次元可視化技術ともいべきテレイグジスタンスについて、その原理と構成法、応用および現在の研究の現況について概説する。

2. テレイグジスタンスの概念

テレイグジスタンスでは、まず、人間型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、それに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。その時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、オペレータの側にお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、視覚を例にとりて説明するならば、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、視野内にはロボットの腕が自分の腕のか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、テレイ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。たと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

*原稿受付 1989年7月4日

**機械技術研究所

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あげられる。

さらに、コンピュータグラフィックスと結合させることにより、実際の世界とは異なる、しかし、あたかも実際の世界のごとき仮想環境 (Virtual Environment) を作り出すことができる。これは人工現実感 (Artificial Reality) 技術と呼ばれる。

仮想環境でのグラフィックスは、人間の動きにより実時間で変化し、人の回りにあたかも実際のように広がる。人が首を振ればそちらの世界が見えるし、移動すればそれに従って変化するので、例えば、人工の迷路の中を歩きまわったり人工のドアを開けて中の部屋に入ったりするような体験を得ることも可能となる。

作業能力の拡大も行え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

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も言えよう。

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なり、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、災害時における捜索、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、広範囲の応用が考えられている。

さて、テレグジスタンスで用いるロボットは知能ロボットである。したがって、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一例を示す。

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。

ロボットの感覚器の情報は、ロボットの知的動

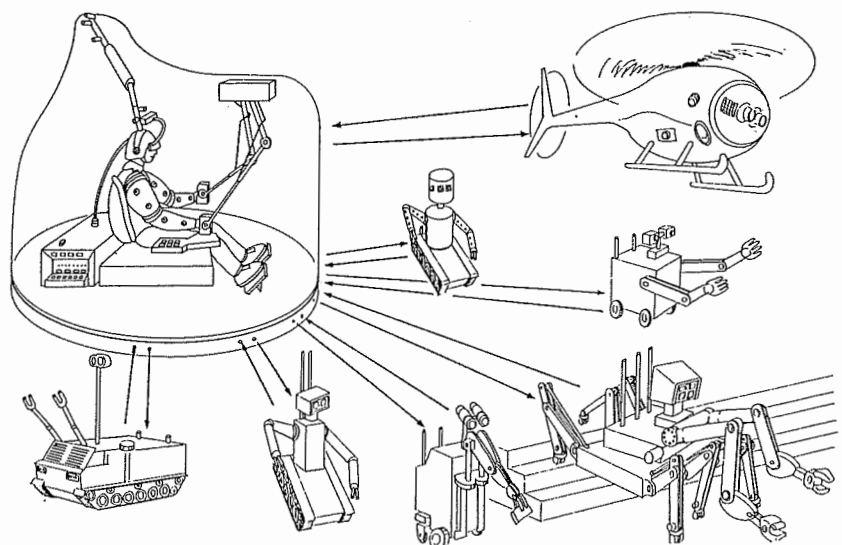


図1 テレグジスタンスを用いる人間ロボットシステム

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うる。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テレ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. テレグジスタンスの基本システム

このようなテレグジスタンスの基本システムの構成法を示す。これにおける臨場的な提示の具体的な構成法を視覚について説明する²⁾。

従来方法は波面の忠実な再構成というところに力点をおいていた。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(a))。しかし、この方法のままでは、以下に述べる理由からテレ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、ホログラフィーでは、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、この方法ではオペレータの手と表示したロボットの手が干渉するなど、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がロボットの中にいる、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2(b)はロボット技術と人間の感覚構造を基にしたテレ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、実際の人の視覚の仕組みを考えると全波面をすべて同時に再現する必要はない。

人の視覚の基礎は、網膜上に写る2枚の画像であり、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。

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こむことによ

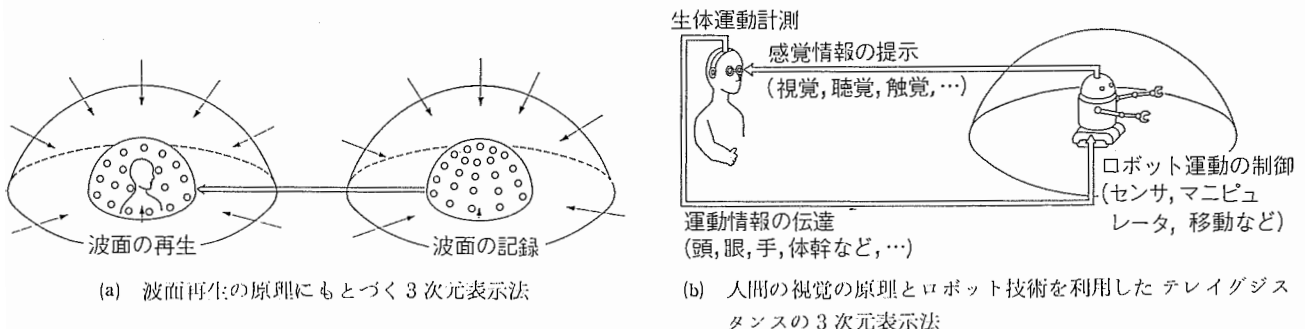


図2

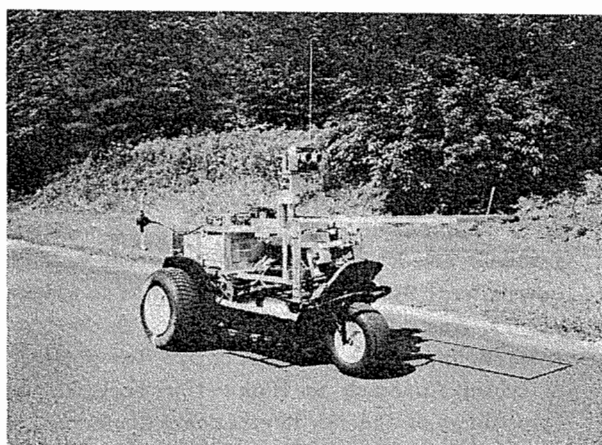
り、記録再生装置が現実に構成可能な大きさとなり、前述の①の問題点が解決される。

また、テレグジスタンスでは、人の存在する側の環境の視覚情報を遮蔽した状態で、そのかわ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である。したがって、従来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。

4. 研究の現状

機械技術研究所では、1981年から研究開発をす



(a) 移動型テレグジスタンスロボット

ずめており、テレグジスタンスシステムの基本概念を確立するための遠隔制御ロボットシステムを研究試作し、その実験に成功している。

図3(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3(b)に示す臨場感提示装置を用いて、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、障害物への接触の有無などの比較から実証されている³⁾。

さらに、遠隔のロボットのいる場所で直接的に作業しているような感覚を有しながら仕事をするための人間型テレグジスタンスロボットも研究

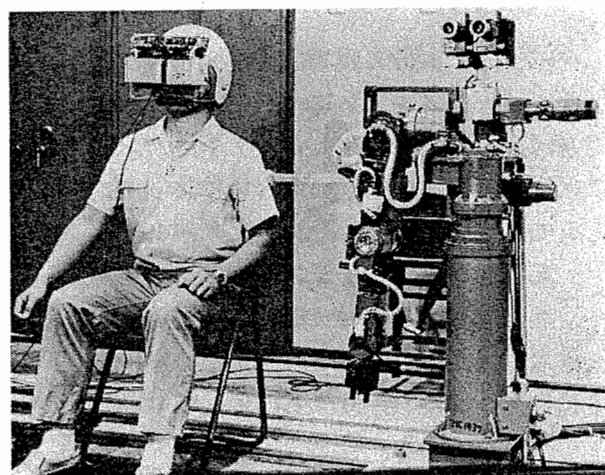
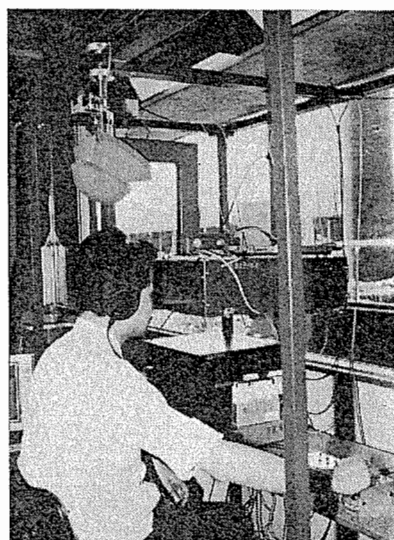


図4 人間型作業用テレグジスタンスロボット(右)と頭部搭載型ディスプレイ(左)



(b) 視聴覚の能動立体ディスプレイ

図3

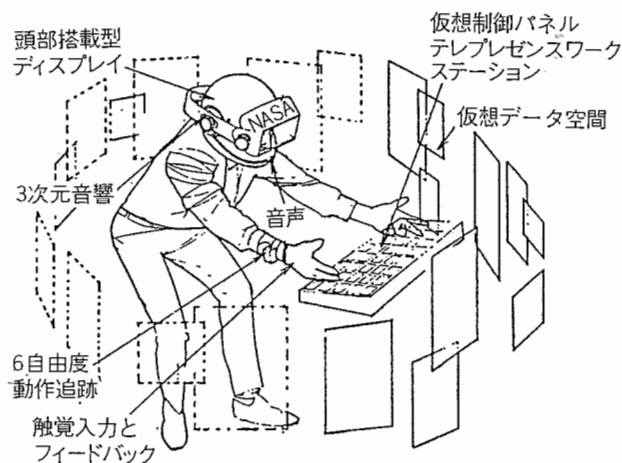


図5 仮想ターミナルの概念

試作されその効果が確かめられている (図4)。

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⁴⁾。

一方, MIT のミンスキーらは, 宇宙開発におけるテレプレゼンスの重要性を主張し, その後, 宇宙ロボットの研究では宇宙用テレロボティクスにおけるキーテクノロジーとして研究されている。

さらに, NASA のエイムズ研究センターでは, 仮想インタフェース環境をめざして, ヘッドマウンティッドディスプレイなど人工現実感の研究が進められている⁵⁾。図5に, NASA の提案する仮想ターミナルの概念図を示す。なお, 東京大学においても同様の研究が進められている⁶⁾。

5. おわりに

ロボットにおける臨場的3次元可視化技術であるテレレイグジスタンスについて概念, 構成法, 応用と研究の現状を概観した。テレレイグジスタンスには3次元画像の処理の度合いによって, 大別して次に示すような三つのシステムがある。

(1) 基本的なテレ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したりするのと同等の効果を得ることが目標となる。

(2) 人間能力拡張システム

ロボットのセンサ情報や内部状態などを人間に分かりやすく3次的に提示したり, 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ったり小さくなったような感覚をつたえ

つつ制御する技術。また, 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実時間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

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行動できるようにすることが, 目標となる。

いずれのシステムに対しても広範囲の応用が考えられるほか, こうしたシステムは人間の感覚制御機構の解明にとっても重要な手懸りを与えるものとなるだけに, テレイグジスタンスの研究は今後ますます盛んになってゆくと思われる。

参考文献

- 1) 館 暁, 小森谷清: 第3世代ロボット, 計測と制御, 21-12 (1982), 1140/1146.
- 2) S. Tachi et al.: Tele-existence (I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proceedings of 5th International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (CISM-IFToMM RoManSy' 84) Udine, Italy (1984), 245/254.
- 3) S. Tachi, H. Arai et al.: Feasibility Experiments on a Mobile Tele-Existence System, Proceedings of the International Symposium and Exposition on Robots, Sydney, Australia (1988), 625/636.
- 4) J. D. Hightower, E. H. Spain et al.: Terepresence: A Hybrid Approach to High-Performance Robots, Proceedings of the '87 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Versailles, France (1987), 563/573.
- 5) S. S. Fisher et al.: Virtual Environment Display System, ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, North Carolina (1986), 1/11.
- 6) 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, 第4回ヒューマンインタフェース・シンポジウム論文集, 東京 (1988), 201/206.