

三次元空間のサイバネティック・インタフェース

館

障**,***

1. はじめに

人間の感覚特性や運動特性の解明結果に基づいて設計され、人間の動的な感覚運動制御特性に精密に適合したインタフェースをサイバネティック・インターフェース (cybernetic interface) と呼ぶ。

離れたところで作業するロボットの存在する場所に、あたかも自分がいて直接自分で作業を行っているかのような実時間臨場感を有してロボットを自在に制御する、いわゆるテレグジスタンス (tel-existence) は、ロボットと人間とのサイバネティック・インターフェースの好例である。

また、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ったり小さくなったような感覚をつたえつつ制御する際の擬似臨場感提示法、あるいは、惑星など時間遅れの無視できない環境下でテレグジスタンスを利用する際の知的モデルの利用技術や3次元グラフィクス技術にとってサイバネティック・インターフェースは不可欠である。

さらに、現実感溢れる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から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人工現実感技術 (artificial reality) も進展している。

本解説では、臨場的三次元空間のマン・マシーン・インターフェースについて、テレグジスタンスを中心として概念、現在の研究状況、今後の展望を概観する。

2. 感覚情報の3次元提示

2.1 3次元空間の視覚認識に関与する立体視の要因

人間が視覚3次元空間を認識する際には、空間からの様々な手がかりを利用している。その内の主要なものは、単眼の情報に基づくものと、両眼の情報に基づくものとに大別できる。また、観察者や対象物体の動きによる認識への手がかりも重要なファクタとなる。

観察者や対象が静止している場合、単眼視における立

体視の要因としては、

- ①水晶体の調節 (accommodation),
- ②網膜像の大きさ (retinal size),
- ③線透視 (linear perspective),
- ④模様勾配 (texture gradient),
- ⑤空気透視 (aerial perspective),
- ⑥重なり合い (overlapping),
- ⑦陰影 (light and shade) などが挙げられる。

一方両眼による立体視の要因には

- ⑧輻輳 (convergence) と
- ⑨両眼視差 (binocular parallax, binocular disparity) がある。

さらに、運動によるものとして、

- ⑩運動視差 (movement parallax) が重要な役割を果たす。

2.2 3次元提示方式

理想的な臨場感提示方式では、2.1で述べた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。現在、行われている3次元空間再生技術としては、単眼視の手がかりを主とした、2次元映像からなる奥行ディスプレイ、2次元映像2枚を提示するディスプレイ、それに運動視覚による多方向からの観察の効果も含めた3次元ディスプレイに大別できる。

大スクリーンを代表例とする奥行ディスプレイでは、透視、照明、対象物体の動きなどの手がかりを主として用いており、大画面による取囲み効果で臨場感を生じさせている。遠距離には効果的であるが、近距離では効果がない。

立体ディスプレイは、両眼視覚効果を用いたもので、メガネ方式と表示面方式とに分けられる。メガネ方式で

原稿受付 1989年10月16日

* Tele-Existence: Cybernetic Interface of Three-Dimensional Space

** 通産省機械技術研究所

*** 東京大学先端科学技術研究センター

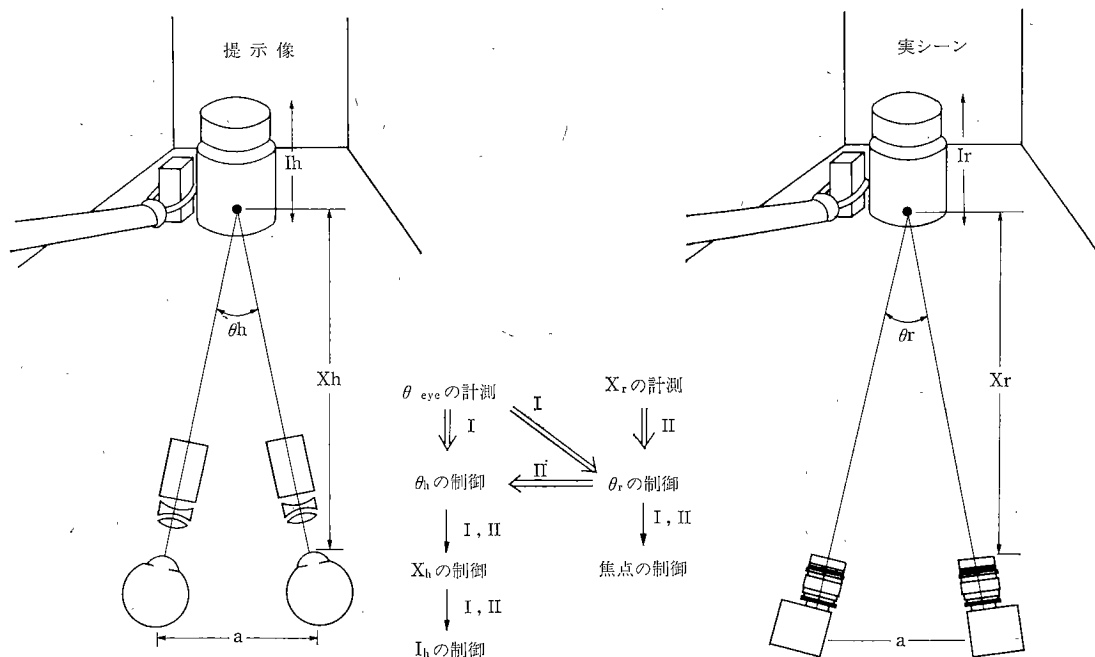


図1 理想的な臨場感覚提示装置

は、2つの画像を同時に提示し、左右像を色や偏光の違いから分離する同時式と、液晶シャッターなどを用いて、左右像を時間的に分離して提示する継時式とに分れる。偏光式を用いる同時式では、2つのディスプレイないしはプロジェクターを必要とするが、目の負担は少ない。継時式は、ディスプレイないしはプロジェクターは1台ですむメリットがあるが、目の負担は残る。表示面方式は、両眼への映像を分離提示するのに、観察側ではなく表示面側に工夫をし分離観察する方式で、レンチキュラ板、ハエの眼レンズ板、パララックスバリヤ、コーナ・キューブ板などを利用して、両眼用の画像を作り出す。メガネを必要としない点にメリットがあるが、観察位置の制限がある点に問題点がある。

3次元ディスプレイは、運動視差、両眼視差、輻輳、ピント調節、網膜像の大きさなどの主要因をすべて考慮し、最も臨場感を伝えるものである。それらは、ホログラフィーやオムニマックス全天周スクリーンなどの、波面再生方式と、観察者の運動を実時間計測し、それにより提示像を変化させ運動視差を生じさせる能動立体ディスプレイ方式に分けられる。

2.3 能動立体ディスプレイ

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を能動立体ディスプレイと呼ぶ。因みに、テ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。

図1に理想的な視覚提示システムの構成法を示す¹⁾。2つのカメラを人の眼間距離 a 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制御されている。まず、I に示すように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 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 $I_h = I_r$ となるようにする。

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。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

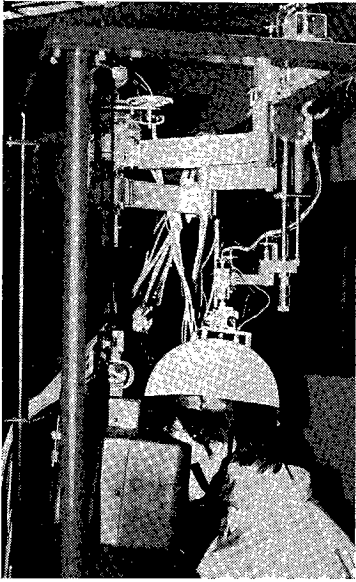


図 2 6自由度マスタースレーブ型臨場感覚提示装置

の輻射範囲に対応できる。したがって、図1の提示像の距離 X_h を常に $X_h=1$ [m] に固定しても臨場感は失われない¹⁾。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射角の2つになり装置の簡略化が可能となる¹⁾。

次に、運動視差の効果を生じさせるために、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とお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、いつも上記条件下で空間知覚が行える様にしている。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

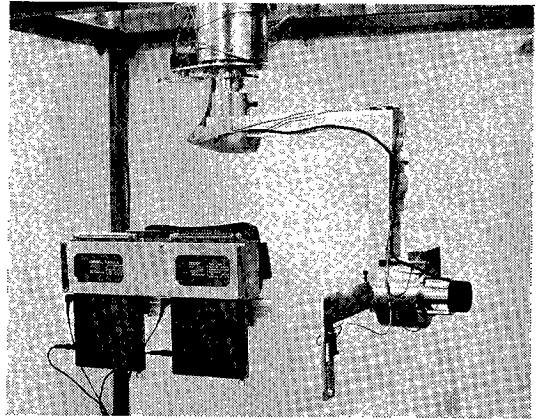


図 3 インピーダンス制御型臨場感覚提示装置

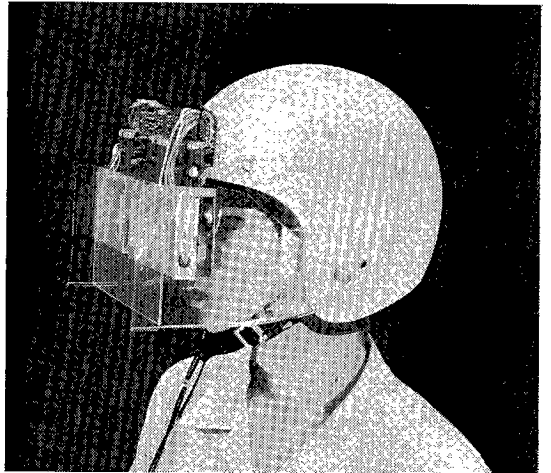


図 4 頭部搭載型臨場感覚提示装置

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。図2に6自由度のマスタースレーブ型提示システムの例を示す¹⁾。

(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。図3は、インピーダンス制御を用いた頭部結合型ディスプレイである²⁾。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計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。

図4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で実時間計測し、スレーブロボットの頭部運動を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²⁾。

2.4 聴覚情報の提示

聴覚の3次元提示に関しては、いわゆるステレオ技術として今までに多くの研究が行われている。波面の再生の考え方に基づくものは、多数のマイクロフォンを閉曲面上に配し録音し、実時間で伝送して、オペレータを囲むように配した多数のスピーカから再生することにより達成できる。もっとも簡単な近似はいわゆるステレオである。

一方、能動立体ディスプレイとしては、ロボットの左右の耳の部分にマイクロフォンを配設し、その情報を耳内イヤフォンでオペレータの左右の耳にそれぞれ送る方式がある。通常のウォークマン等のヘッドフォンを用いると、頭の運動に連動して音場が変化しないので音源の絶対位置が変化してしまい真の臨場感が伝わらない。例えば顔の正面にある音源は頭を動かしても、やはり頭の正面に来てしまう。しかし、能動立体ディスプレイでは、オペレータの頭部運動を計測して、それに応じてロボットの頭部運動を制御する為、頭を動かしても音源の絶対位置は変化せず、相対位置が変わるので真の臨場感ある音場が再現できる。

2.5 触覚情報の提示

触覚情報の提示に関する研究は、視聴覚に比較して遅れている。

触覚の提示は当然、操作指示の方式と併せて考えるのが普通である。操作方式としては、

- ① マスタマニピュレータ、
- ② 3次元ジョイスティック³⁾、
- ③ データグローブ

の3つの方式が三次元の位置と方向を直接的に指示出来る物の中で特に有望である。

①のマスタマニピュレータにおいて、通常のバイラテラルのマスタの有する力フィードバックに加え触覚情報もフィードバックする。力情報のフィードバックについては、従来の対称型、力逆送型、力帰還型を一步進めて、力感覚のテレグジスタンスあるいは、対象物のテレパセプション⁴⁾をめざした研究が進められている。インピーダンス制御型のマスタ・スレーブ・システムの研究⁵⁾⁶⁾はその好例といえよう。触覚情報についても、触覚のテレグジスタンス⁷⁾をめざした研究が始められており注目される。

②は、ジョイスティックで代表される方式である。スティックが多数のワイヤで空間的に吊られており、オペ

レータはそのスティックを空間の6自由度に動かして指示する。ワイヤがアクチュエータにより駆動される仕組みになっており、反力が人にもどる。触覚情報はスティック部で伝えるが、現在は接触情報程度を伝えられるにすぎない。

③は人の手をしたグローブにオプティカルファイバーを配し、人の指の動きまでも検出する。手の位置と姿勢は磁気センサで空間の6自由度の情報を測定する。力のフィードバックに問題点が残されている。形状記憶合金の利用が考えられているが、まだ成功はしていない。

触覚情報の提示法としては、

- (i) レリーフ状の形態表示、
- (ii) 人の皮膚への振動刺激による表示、
- (iii) 人の皮膚への電気刺激による表示

等が利用できるが、どれもまだ研究段階の域を脱していない。もっとも、これらの触覚情報提示技術は盲人用ないしは聾者用の感覚代行システムの研究の範疇で今まで多くの研究がなされてきており、それらを基にした新たな発展が期待されている。

3. テレグジスタンス

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り、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、1983年の宇宙開発に関連したMITの報告書ARAMISの中で、テレプレゼンス(telepresence)なる言葉が初めて用いられたが⁸⁾、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⁹⁾基礎研究が始められており¹⁰⁾、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。

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¹⁾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。

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。図5に示すロボットは、形状や自由度の配置を人間のそれらに類似させて構成した人間

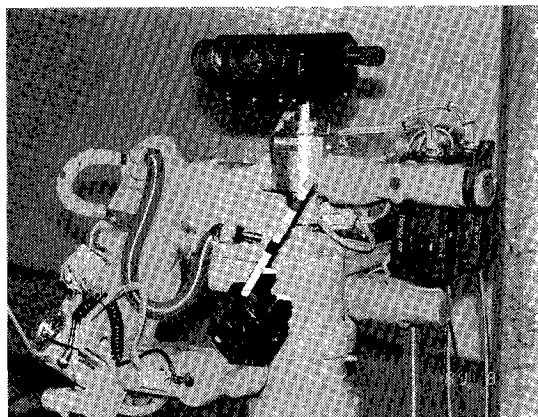


図5 人間型スレーブロボット

型スレーブロボットである²¹⁾。このロボットと図6に示すマスターシステムとを用いて作業を行い、従来の2次元ディスプレイとの比較の結果、その優位性が検証されている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⁾。

4. 人間能力の拡張と人工現実感

4.1 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大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。例えば、ロボットの赤外線センサを利用して環境を探索

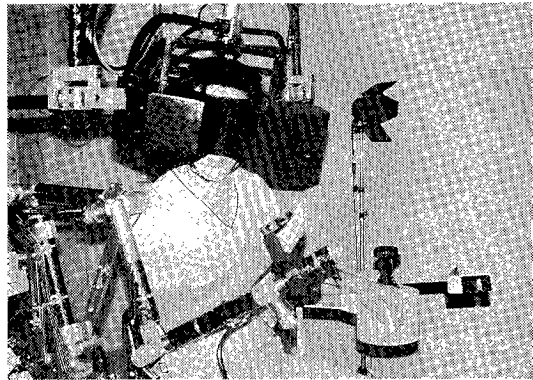


図6 作業用トレイグジスタンス・マスターシステム

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、暗闇の中でも物を明るい所で見えるような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。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。

4.2 人工現実感

このような、擬似臨場感の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。

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¹⁴⁾。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ー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。因みに、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ースーツや、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

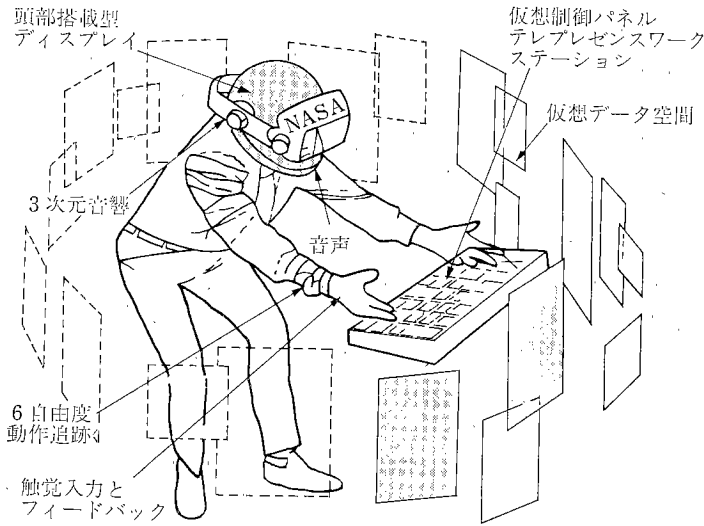


図7 仮想ターミナルの概念

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。図7に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、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¹⁵⁾。

☆ ☆

トレイグジスタンス等のサイバネティック・インタフェースを用いる代表的な目的としては、次の三つがあげられる。

(1) ロボット等の知的機械がその知能の範囲内で、目的の仕事を行えない場合、人間が遠隔から支援する際に用いる。そのような場合は、一般に人間にとっても困難な状況であり、かつ緊急な場合が多く、その場での訓練や練習が許されない。従って、人間は自分の過去の何十年来の経験を最大限に発揮し作業を行うわけで、自分がその場に直接いるかのような極めて高度の臨場感と、人間感覚に適合したロボットやコンピュータからの付加情報の人間への効果的提示技術が必須となる。

(2) 人間が体験したり、自己の経験を高めたり学習したりするために用いる。人は様々な体験を通して成長する。しかし、代償があまりにも大きすぎる危険な体験もある。又、遠隔地のためや、クリンルーム等人が行けない場合もある。人間の体内など空間的制約で人間が入れないこともある。そのような時でも、サイバネティ

ク・インタフェースによりそれが可能となる。

(3) 実際に可能性のあるハードウェアのシステム、建築物や製品、あるいは、インテリア等を作りそれらと比較することは、コストの面からも製作に要する時間的制約からも不可能な場合が多々ある。人工現実感に基づく仮想環境を人間が体験しつつ比較することにより、可能性をすべてつくした最適設計や個人の好みに応じたカスタム化がダイナミックに行える。また、狭い場所でも仮想環境を選択的に提示することで広く使う等空間的制約が解消できる。

その他にも、マイクロサージャリや臨場の内視装置等医療への適用、体験シミュレータによる教育、人間の特性を動的に調べるために、人間に現実感溢れるしかし提示条件の明確な情報を提示しつつ、その条件下での行動を観測するといった認知科学や行動科学での利用等多彩な用途が考えられる。このような無限ともいえる可能性を秘めたサイバネティック・インタフェースの研究は今後ますます盛んになって行くであろう。

参考文献

- 1) 館 暲, 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, Vol. 7-4, pp. 314-326, 1989.
- 2) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: "Development of anthropomorphic tele-existence slave robot", Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 385-390, Tokyo, Japan, 1989.
- 3) M. L. Agronin: "The design of a nine-string six-degree-of-freedom force-feedback joystick for tele-manipulation", Proceedings of the NASA Workshop on Space Telerobotics, pp. 341-348, Pasadena, CA, 1987.
- 4) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa: "Control of mas-

- ter slave manipulators for object teleperception", Proceedings of the 5th International Symposium of Robotics Research, Tokyo, Japan, 1989.
- 5) 縮 暲, 藤 泰輔: "テレイドジスタンスの研究 第17報 - インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム", 第28回SICE学術講演会予稿集, pp. 731-732, 1989.
 - 6) J. Dudragne et al.: "A generalized bilateral control applied to master-slave manipulators", Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, pp. 435-442, Tokyo, Japan, 1989.
 - 7) 伊福部達: "感覚フィードバック型ハンド", 日本ロボット学会誌, Vol.7-5, pp. 496-500, 1989.
 - 8) 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.
 - 9) 縮 暲, 谷江和雄, 小森谷清: "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, 出願 1981 年 1 月 14 日.
 - 10) 縮 暲, 阿部 稔: "テレイドジスタンスの研究第1報", 第21回SICE学術講演会予稿集, pp. 167-168, 1982.
 - 11) 縮 暲, 荒井裕彦, 前田太郎, 常本直貴: "テレイドジスタンスの研究 第19報", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 55-56, 1989.
 - 12) J. D. Hightower, E. H. Spain et al.: "Telepresence: A hybrid approach to high-performance robots", Proceeding of '87 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Versailles, France, pp. 563-573, 1987.
 - 13) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: "Tele-existence simulator with artificial reality", Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and System (IROS), pp. 719-724, Tokyo, Japan, 1988.
 - 14) S. S. Fisher et al.: "Virtual environment display systems", ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, North Carolina, pp. 1-11, 1986.
 - 15) 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, pp. 201-206, 1988.



縮 暲 (Susumu TACHI)

昭和 43 年東京大学工学部計数工学科卒業。48 年同大学院博士課程終了。工学博士。同年東京大学助手。50 年通産省機械技術研究所研究員。主任研究官, 遠隔制御課長を経て, 現在ロボット工学部バイロボティクス課長。東京大学先端科学技術研究センター助教授を兼務。盲導犬ロボット, テレイドジスタンスなどの研究を行う。54-55 年マサチューセツ工科大学(MIT) 客員研究員。62 年から現在, IMEKO (国際計測連合学会) TC 17 (Robotics) 議長を務める。58 年IEEE/EMBS 学会賞受賞。63 年通商産業大臣賞研究業務優秀者表彰受賞。

(日本ロボット学会正会員)