

## 解説

## レイグジスタンスと認知的制御

館 暁\*

## 1. はじめに

遠隔に配置された機械の腕(マニピュレータ)を器用に操るための、いわゆる遠隔操作の概念はテレオペレータ(teleoperator)と呼ばれている。これは原子力用のマニピュレータや上肢切断者用の動力義手などの技術とともに生じた概念である。テレオペレータでは、人から機械に向かう制御系が強調されているが、機械から人への感覚フィードバックは、力の情報を対称型や力帰還型でオペレータに伝える程度であり、人がその場で作業をしているような視聴覚や感覚を統合した臨場感を持ちながら作業をすることはできなかった。

人が直接作業を行うのが危険な環境下でロボットに作業を行わせる場合、オペレータが直接そのロボットの存在する場所で作業をしているような臨場感を有して現場の状況を把握し作業を行えることが望ましい。機械からオペレータへの感覚フィードバックを臨場感の高いものとするための研究が近年になり盛んになりつつある。これは、テレプレゼンス(telepresence)<sup>1),2)</sup>、あるいはレイグジスタンス(tele-existence)<sup>3),4),5)</sup>と呼ばれている。

なぜレイグジスタンスを使うのか、その目的は千差万別、多種多様である。あえてスキルの問題に即して答えるならば、人間のスキルを、ロボットに移すためと言う事もできよう。

そのような観点からレイグジスタンスの使わ

れる状況を整理すると次の用になる。

(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やスキルを最大限に発揮し作業を行うことになる。そのためには、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を行う事が必須となる。

(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、埃をきらうクリーンルーム等の環境下等、人が行けない場所もある。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、レイグジスタンスにより原理的には、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を比較することは、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。レイグジスタンスの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、マイクロサージェリや臨場的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、その条件下での行動を観測するといった認

平成元年 11月 22日 受付

\* 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

〒305 つくば市並木 1-2, 〒153 目黒区駒場 4-6-1

キーワード: レイグジスタンス(tele-existence) 仮想環境(virtual environment) テレプレゼンス(telepresence) 感覚運動制御(sensory control) 人工現実感(artificial reality)

知科学や行動科学での利用等多彩な用途が考えられる。

本解説では、トレイグジスタンスの基本原則を示し、その研究の現状を紹介するとともに将来を展望する。また、トレイグジスタンスを用いる人間の認知制御機能解明の試みを提案する。

## 2. テレイグジスタンスの原理

図1にト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(I)は、従来から考えられているホログラフイー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トレイグジスタンスの実現は困難である。

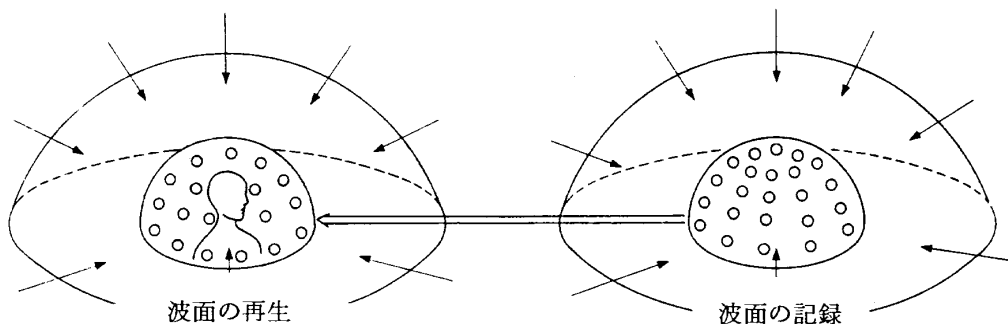
①記録・再生の装置が実物大の環境再構成をねらうと非常に大きなものになってしまい実際的ではない。また、ホログラフイーでは、実時間の情報の記録・再生が現在の技術ではできない。

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つては、本当の臨場感は得られない。ト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。従つて、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りかわつ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(II)はロボット技術と人間の感覚構造を基にしたトレイグジスタンスの構成方法である。

I)



II)

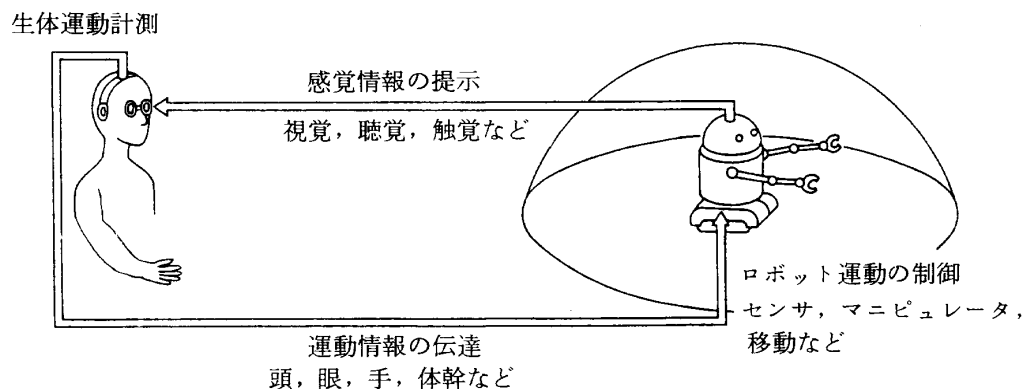


図1 テレイグジスタンスの原理

(I)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。

従って、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等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等の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、提示装置及びスレーブ・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、ト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。更に、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。

従って、従来の(I)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. テレイグジスタンス研究の現状

#### 3.1 基本型トレイグジスタンス

現在までに、視覚提示システムの設計法の研究を中心とした研究<sup>5)</sup>が進められる一方、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。図2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<sup>6)</sup>。このロボットと図3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、トレイグジスタンス方式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(図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事が示されている。

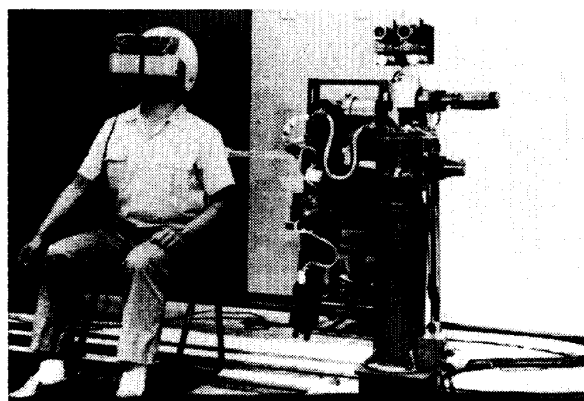


図2 人間型スレーブロボット(右)と頭部搭載型臨場感覚提示装置(左)



図3 作業用トレイグジスタンス・マスターシステム

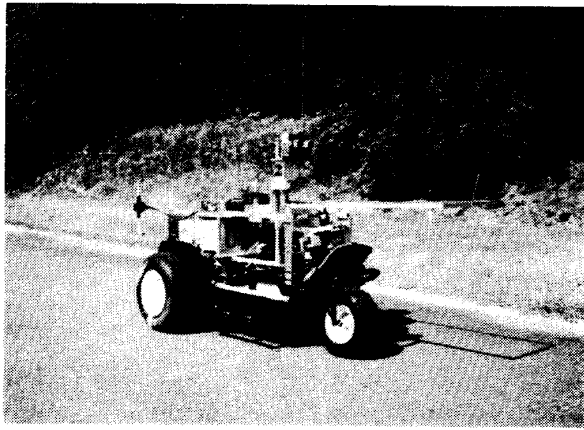


図4 移動型テレグジスタンスロボット

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<sup>2)</sup>。

### 3.2 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ゝ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<sup>7)</sup>。

すなわち、テレ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るとような臨場感をもって見る事ができる。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。

### 3.3 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<sup>7)</sup>。

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<sup>8)</sup>。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、三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<sup>9)</sup>。

#### 4. 人間の認知制御特性の解明への利用

人間は、視覚、聴覚、触覚等の感覚器からの情報に基づいて、自らの行動を制御する。目と手の協調作業や、障害物のある空間内の移動動作などの感覚運動制御は、この人間の認知的制御の好例である。

このような感覚運動制御特性の解明は、生体の神秘を解き明かすという科学的興味に加えて、次世代のロボットなど、将来の工学技術分野への幅ひろい応用の可能性を秘めているが、工学や技術に利用可能な解明の段階には程遠い現状にある。

工学や技術に利用可能な解明を考えた時、従来の生理学的方法や解剖学的方法あるいは、心理学的な方法だけでは不十分である。現在、利用されている工学的手法も認知的制御特性の解明には必ずしも十分とは言えず、新しい研究の方法論が求められている。というのは、認知的制御において

は、人間の行動が伴うわけで、人間が自然な状態で、しかも拘束されずに行動できる状況下で、なおかつ繰り返し正確に再現可能な条件下で、人間の行動を観察し解明研究を行わなければならないからである。

現在、この認知的制御特性の解明を目指した、感覚の統合や能動感覚の研究あるいは、視覚特性の解明の研究が情報制御工学と認知科学の方法論の新しいスキームのもとに統合しつつ展開されている<sup>10)-15)</sup>。

ここでは、トレイグジスタンスの方法の認知的制御研究への利用法の一例を提案する。

人間が作業を行う際に、いかなる感覚情報を取り込み、それに基づいて作業を行うかを定量的に解明し作業に必要な十分な感覚情報を確定するとともに、情報制御モデルを構築し、感覚運動制御のメカニズムを解明することが求められている。

そのために、人工的に構成されながら極めて臨場感の高い三次元空間状態を被験者に特殊な提示装置により提示し、被験者に提示する感覚情報の量と質とをコントロールしつつ、その環境下での

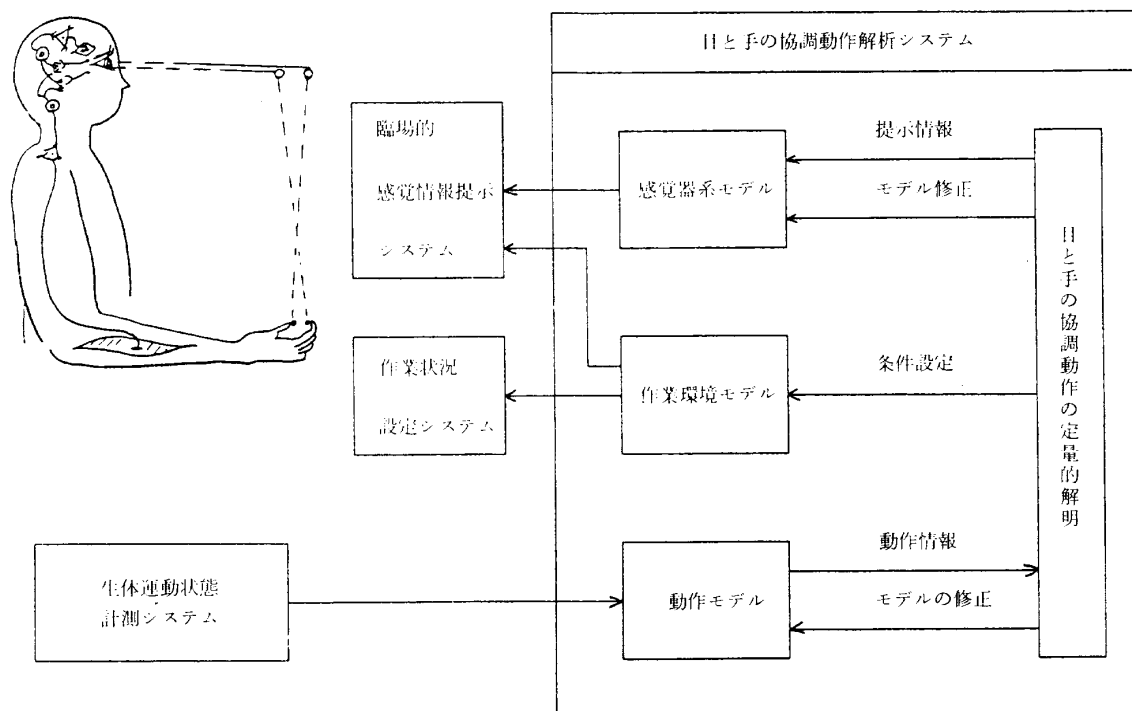


図5 テレイグジスタンスを用いる目と手の協調制御機構解明システム

行動を正確かつ定量的に捉えるという新しいアプローチが用いられる。

図5にトレイグジスタンスを用いる目と手の協調解析システムの構成例を示す。

人間は、作業状態設定システムと臨場の感覚情報提示システムによりコンピュータグラフィックスを用いて構成された極めて現実に近い状況でありながら、何度でも再現可能でかつ微妙に空間の状態を制御可能な環境内で対象を認知しそれに対して行動する。その時の人間の行動は、生体運動状態計測システムにより、すべて実時間に記録される。

一方、解析システム内には、感覚器モデル、人間の動作モデルが構成されており、同一の提示条件がモデルにも加えられ、モデルの動作が調べられ、人間の動作と比較される。目と手の協調動作の定量的解明システムにおいて、人間とモデルの比較がなされ、人間の動作に近づくような修正がモデルに対してなされていく。

可能な限り様々なモデルを考え、考えられるすべてのモデルに対して提示条件を様々に変えても、常に人間と同じ動作が可能になるモデルを探し出す。もしそのようなモデルが同定されれば、そのモデルは人間の構成的解析モデルとなっており、工学的応用にも用いやすい。

このように、トレイグジスタンスはそのような臨場の感覚情報の提示手段として利用できる。

## 5. おわりに

トレイグジスタンス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、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事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。

また、トレイグジスタンスは、人間の太古からの夢の一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。

さらに、コンピュータとの結合により体験的シミュレータが構成できるほか、人間の認知的制御機能の解明の有効なツールを提供するなど、今後ますます応用の領域をひろげてゆくであろう。

## 文 献

- 1) Akin, D.L., Minsky, M.L. et al.: Space application of automation : Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS)-Phase II, NASA Contract Report 3734 (1983)
- 2) Hightower, J.D., Spain, E.H. 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)
- 3) 館 暉, 阿部 稔 : 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)
- 4) Tachi, S., 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-IFTOMM, Udine, Italy (1984)
- 5) 館 暉, 荒井裕彦 : 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)
- 6) Tachi, S., Arai, H., & Maeda, T. : Development of anthropomorphic tele-existence slave robot, Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, 385-390, Tokyo, Japan (1988)
- 7) Tachi, S., Arai, H. & Maeda, T. : Teleexistence simulator with artificial reality, Proc. of IEEE International Work Shop on Intelligent Robots and Systems, 719-724, Tokyo, Japan (1988)
- 8) Fisher, S.S. et al. : Virtual environment display systems, ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, North Carolina, 1-11 (1986)
- 9) 広瀬通孝ほか : 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, 201-206 (1988)

モデル, 計測自動制御学会論文集, 25 (10),  
1111-1118 (1989)

- 10) 赤松幹之, 石川正俊: 形状知覚における視-触覚の感覚統合過程での触運動の変化, 第4回生体・生理工学シンポジウム論文集, 275-278 (1989)
- 11) 阪口 豊, 中野 馨: 感覚系と運動系の協調システム(II), 第4回生体・生理工学シンポジウム論文集, 263-266 (1989)
- 12) 出澤正徳, 程 康: 視覚機能研究におけるコンピュータ・グラフィックスの利用と課題, 第10回理研シンポジウム, 33-39 (1989)
- 13) 笠井 健: 感覚・知覚と運動の統御機構, 計測と制御, 25 (2), 136-142 (1986)
- 14) 伊藤宏司: 筋運動制御機構, 計測と制御, 25 (2), 131-135 (1986)
- 15) 前田太郎, 舘 暲: ホロボタを生じる空間知覚モデル, 計測自動制御学会論文集, 25(10), 1111-1118(1989)



舘 暲(たち すすむ)昭和48年東京大学大学院博士課程終了, 工学博士, 同年同大助手, 50年通産省機械技術研究所研究員, 主任研究官を経て, 現在, ロボット工学部バイオロボティクス課長, 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, テレグジスタンスなどの研究を行う. 54-55年MIT客員研究員. 62年から現在, IMEKO/TC17(Robotics)議長. 58年IEEE/EMBS学会賞, 63年通商産業大臣賞研究業務優秀者表彰授賞.