

# JITA

JAPAN INDUSTRIAL TECHNOLOGY ASSOCIATION

# NEWS

1989 No.

# 5

〈試験研究所ハイライト〉

## 人間と共存する第三世代ロボットの研究

機械技術研究所 ロボティクス部

遠隔制御課長 舘 暲

この論文は、昨年（11月7日）工業技術院創立40周年に式典において、通商産業大臣表彰を受けた同氏の研究テーマをまとめたものです。

### 1. はじめに

ロボットは、本質的には人間の友として人間と共存する環境でも利用されるべき機械である。そのような来たるべき新しいロボット技術の本質を明確にするためには、ロボットを世代で分析整理し、適切な位置づけを行う必要がある。

1960年に初めて製品化されたユニメートで代表されるプレイバックロボットが、ロボットの第一世代である。これは、技術的には、内界センサとロボット技術を主体としたものである。これに外界センサとマイクロセッサ技術が加わったいわゆるセンサベーストロボットが、第二世代の適応ロボットである。それらに対して第3世代ロボット技術は、高度な情報処理技術とコミュニケーション技術を主な特徴としている（図1）。

第一、第二世代が製造業を中心とする工場内での

利用を主とするのに対して、第三世代以降のロボットでは、ロボットを工場の外での非製造業分野で利用することに力点をおいている。

以下に示す盲導犬ロボットの研究とテレイクジスタンスの研究は、この人間と共存する第三世代ロボット研究の好例といえよう。

### 2. 盲導犬ロボットの研究

#### 2.1 盲導犬ロボットの必要性

暗い部屋に急に入った時や、不意の停電時など、目が見えないということがいかに不便であり、また心理的に不安であるかが痛いほどわかる。そのような不便さと精神的な不安感を目の不自由な人は一生の間感じ続けている。特に全国35万人といわれている目の不自由な人の要望のうち、読み書きとならんで自由な単独行動への願望は切実である。科学技術により支援し、目の代わりをして人を導いてくれる機械はできないものであろうか。機械と人間との巧みなシステムを構成し、失われた視覚が本来伝えるはずの外界の情報を耳や皮膚といった残存感覚系や利用可能な視神経系などを用いて代行し補っていこ

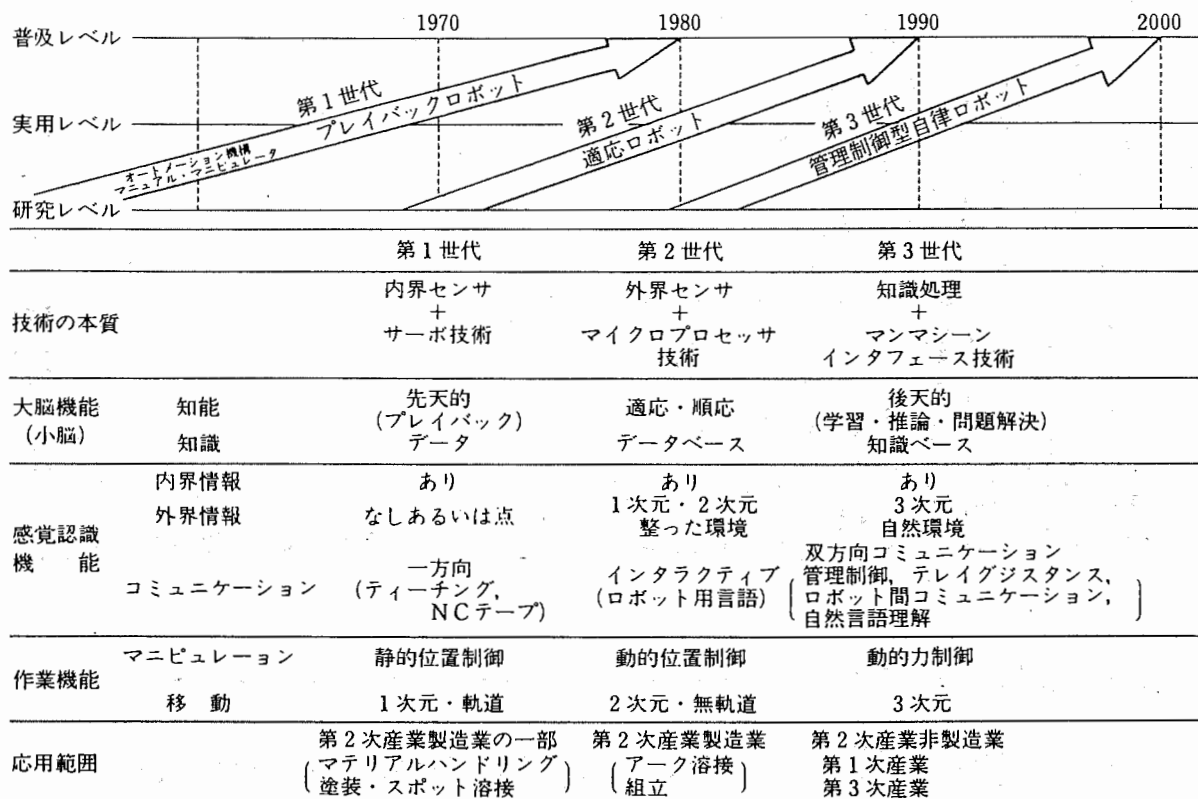


図1 ロボットの世代分けとその特徴

うとする考えは、第二次世界大戦後のサイバネティックスの興隆を契機としておきた。国の内外で、超音波眼鏡やレーザ杖など様々な製品が試みられたが、残念ながらいまだ理想的な補助装置を得るには至っていない。

現行の最も理想的な歩行補助の一つは盲導犬により行われている。古来、イヌは人に代わって盲人を導くのに利用されており、それが、今世紀に入ってからの本格的な訓練法の確立によって常時供給可能な優れた補助装置となった。しかし、動物であるがゆえの固有のいくつかの欠点も有している。すなわち、その「訓練」、「飼育」に莫大な労力を要する。「訓練」に耐える犬の数は極めて少なく、また7~8年程度しか使用できないため現在、全国で400頭前後しか利用できず、将来大幅にふえることも望めない。「飼育」については、食事、排せつ、手入れ、病気などの問題が常にあり、家族が一人ふえた程度の手間がかかる。また、都市化された環境、特にマンション、アパート、社宅等の住居ではペット規制や散歩させる場所の問題から実際上利用できない。そのような状況から、盲導犬の有する優れた機能を持つ歩行誘導機械が切望されている。

上記の背景に鑑み、1年間の予備的な調査研究を

へて、昭和52年度から6年計画で「歩行誘導機械」の特別研究を行った。これは、移動ロボットの知的なナビゲーション技術と人間と機械のコミュニケーション技術とを確立し盲人の街路歩行補助を行うための基礎的な研究であり、盲導犬の機能を一つの目標としていることから「盲導犬ロボット」の研究と呼んでいる。

現在までに MELDOG と呼ばれる試作実験装置の MARK I から MARK IV が試作され、それらを用いた実験の結果、盲導犬ロボット実用のための技術的な可能性が実証された。

## 2.2 盲導犬ロボットのシステム構成

従来の補助器の設計は、単独歩行の過程を、①次の一歩の確保、②方向づけ、③ナビゲーションの部分から全体という順序で達成しようとしていたといえる。一方、盲導犬の訓練過程を考えると、その順序はむしろ、③→②→①と全体から部分という逆の順序となっている。

すなわち、(i) 盲人の命令に従って直進、左折、右折などを先導する「服従」の訓練が行われ、そののち、(ii) そののち、障害物のある場合には、盲人の命令に従わず停止して、そのことを盲人に知らせ、

場合によってはそれを回避する「賢い不服従」の訓練が行われる。盲導犬のシステムにおいては、「服従の機能」が③と②の機能に対応し、「賢い不服従の機能」が①の機能に対応していると考えられる。さらに、「人とイヌとのコミュニケーション」が重要な役割を果たしている。

盲導犬ロボットにおいては、盲導犬の機能を上記の、(i) 服従、(ii) 賢い不服従、(iii) マン・マシンコミュニケーションに大別し、それらを機械に適した方法で実現する。その場合、この盲導犬ロボットシステムにおいても、盲導犬と同じ、③→①の設計法をとっている。「服従の機能」は、マップとランドマークを利用する誘導サブシステムと中枢サブシステムにより、また、「マン・マシンコミュニケーション」はコミュニケーションサブシステムを中心として実現される。

### 2. 3 MELDOG の機能

MELDOG には、マップと呼ばれる外界環境のモデルが内蔵されている。これは一種のデータベースである。使用者が、現在地と目的地のコードをロボットに入力すると、ロボットはマップを用いて、目的地までの最適経路を探索し、それに基づいて行動する。

最適経路は位置と方向とを指定したベクトルとして与えられるサブゴールのシーケンスであって、そのサブゴールのベクトル間の具体的な軌道はロボット自体が自動的に創製する。

実際に環境とロボット内部の環境モデルとの間には必ず誤差があり、これを修正しなければならない。その修正は、マップ内部に予め登録された、外部環境のランドマークを計測することにより行われる。

データベースに記述されていなかったり、あるいはデータベースと異なる外部環境が障害物である。この障害物には一般に移動障害物と静止障害物がある。移動障害物に対しては、移動体の速度を測定し衝突の可能性を判断し対処する。例えば前を横切る車のような物に対しては停止して行き過ぎるのを待ち、前を歩く人には同じ速度についてゆく。静止した障害物の場合には、その横を回って進めるかどうかの判定が必要となる。回避できる場合には、そのようなコースをロボット自体が発見し回避する。通行不能の場合には、その道を通らずに目的地にむかう別のルートを探索しなおす。

上記の経路情報や障害物情報がコミュニケーション

系を介して人に伝えられる。また、人の動きをロボットが常時把握しており、例えば人の歩行速度にあわせたロボットの速度制御や危険状態の警告等も行う。

1976年の予備的研究ののち、1977年から6年間特別研究が行われ、盲導犬ロボットの技術的な可能性が検証された。現在は、モデル地区での利用を検討しつつ、ロボットとしての知能の一層の向上を図っている。

写真1に MELDOG MARK IV による実験風景を示す。



写真1 盲導犬ロボット MELDOG MARK IV

### 2. 4 まとめ

盲導犬ロボットという概念を世界で初めて提唱するとともに、このアイディアの工学的な実現法を理論的に研究し、この方法で、実際に実現可能であることを、MELDOG と呼ぶ実験用ロボットを試作し、具体的に示した。また、この研究の過程で、人間とロボット間の双方向情報伝達手段を研究し、人間の皮膚の電機刺激などにおける情報伝達特性を明らかにした。

### 3. テレイグジスタンスの研究

#### 3. 1 テレイグジスタンスとは

離れたところにいる人間（操作者）が、ロボットのあ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(Tele-existence；遠隔臨場制御)と呼んでいる。

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。人が自分の腕を目の前にもってくると、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われてくる。

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。

また、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。たとえば赤外線センサ情報を可視光に変換して、臨場的に提示することで、暗闇の中でも、明るい場所でも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挙げられる。

### 3.2 テレグジスタンスの原理と実現法

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してみよう。

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、以下に示すように、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等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。

### 3.3 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遠隔制御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年間計画であり、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

中心とした研究が進められているが、最近、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た。

このシステムで最も重要なファクタは、人間がその場を自分で直接見ているような、臨場感である。臨場感の第1の秘密は、ロボットに人間のディメンジョンに合わせて取付けた2台のテレビカメラにある。カメラがとらえた2つのテレビ画面は、電波として遠隔の管制室に送られる。その画面が、操作者の頭に固定した立体映像装置を通して、左右の目で別々に観察される。人間の視覚特性に基づいて特別設計されたこの装置によって、操作者の目の前に、ロボットの視野がカラー立体映像として展開される。もちろん、音も立体的に広がる。

操作者は、この臨場感に富んだ立体映像を見ながら、また立体音響に耳をすましながら、手元のレバーで移動ロボットの発進・加速・操舵の指示を行う。操作者が必要に応じ、頭を左右に振ると、ロボットに積んだテレビカメラも同時に左右に向く（写真2(a)参照）。以上は、すべての無線のモデルを介して、立体映像装置とロボットに積載されたマイクロプロセッサで行われる。

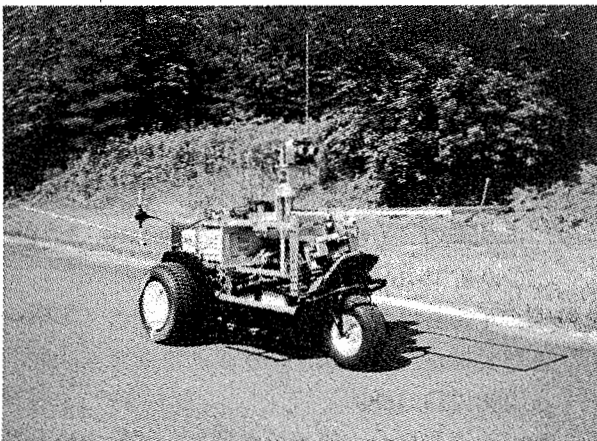


写真2(a) 感覚付移動ロボット Tele-vehicle 1

機械技術研究所の構内の外周路を利用した走行試験の結果、障害物のある通路も、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確認された。また、従来の平面的なスクリーンによる提示の優位性が、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、確認された（写真2(b)参照）。

次の段階としてマニピュレーション作業用のテレ

イグジスタンスシステムが研究試作された（写真3(a)）。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する。

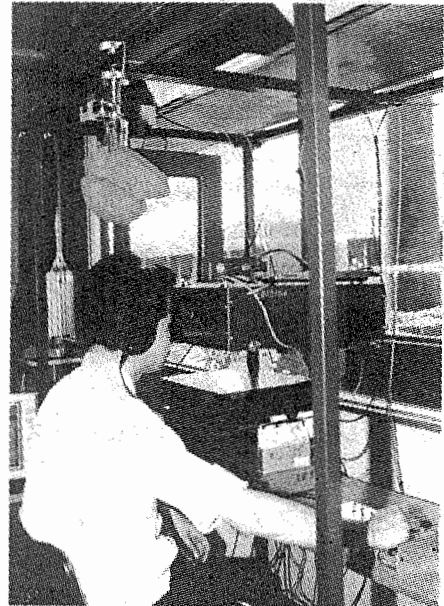


写真2(b) 実時間臨場感を有する立体ディスプレイ

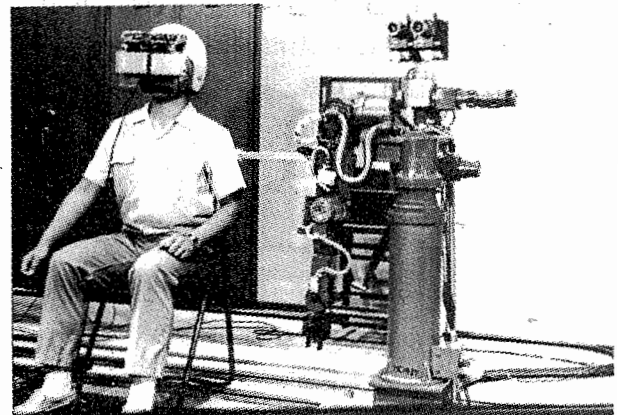


写真3(a) マニピュレーション作業用レイグジスタンス実験装置 (人間型スレーブロボットと頭部搭載型ディスプレイ)

写真3(b)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。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。なお、マニピュレータ操作は、オペレータが手に持った磁気センサで行っている。

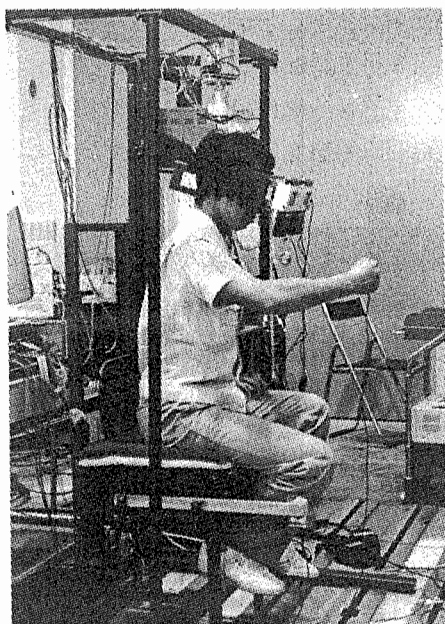


写真3(b) テレイグジスタンス作業用マスタ装置

### 3. 4 テレイグジスタンスの応用分野

テレイ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、組立作業、災害時における搜索、人命救助、復旧作業、通常時においては清掃作業、土木建設作業、農林水産業、医療福祉、警察、探索、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。

### 3. 5 まとめ

ロボットとオペレータが一体化したような感覚をオペレータに与えつつロボットの制御を可能とするテレイグジスタンス（遠隔臨場制御）という新しい概念を初めて提案するとともに、そのアイデアが工学的に実現可能であることを理論的に研究し、その実現可能性と具体的な設計法を実際の実兼用テレイグジスタンスシステムを構成して明示した。すなわち、人間が三次元の視聴覚空間を頭の中で再構成するメカニズムを解析し、人間の感覚特性とロボット技術を利用し、人間がその場にいるような実時間臨場感を生じさせるテレイグジスタンスのコンセプトを確立し、その工学的実現可能性を実証した。

## 4. おわりに

ロボットを人間の共として、人間と共存する環境で利用する際に必要となるであろう基礎研究を行った。また、この来たるべき新しいロボット技術の本質を明確にするために、ロボットを世代で分析整理し、内界センサとサーボ技術を生体とした第一世代、外界センサとマイクロプロセッサ技術による第二世代に対して、第三世代ロボット技術を高度な情報処理技術とコミュニケーション技術を主とするロボット技術として位置づけ、これの積極的な研究開発を行った。特に、二章と三章で紹介した盲導犬ロボットとテレイグジスタンスの研究はロボットを工場外の非製造分野で利用しようとする第三世代ロボット研究の代表例となっている。

### 参考文献

#### <第三世代ロボット>

- 1) 館, 小森谷: 第3世代ロボット, 計測と制御, vol.21, no.12, pp.1140-1146, 1982.
- 2) S.Tachi: Human Robot Systems in the Third Generation Robotics, Invited Lecture at the Australian Academy of Technological Sciences, 1987.
- 3) 館: メカトロニクスのはなし, 日刊工業新聞社, 1984.

#### <盲導犬ロボット>

- 1) 館, 小森谷ほか: 人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方法, バイオメカニズム, 4, pp.279-289, 1978.
- 2) 館, 小森谷ほか: ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法, バイオメカニズム, 5, pp.208-219, 1980.
- 3) 館, 小森谷ほか: 視線可動型センサを用いる自律移動機械の移動制御, バイオメカニズム, 6, pp.242-251, 1982.
- 4) S.Tachi, et al.: Guide Dog Robot-Its basic olan and dome experments with MELDOG MARK I, Mechanisms and Machine Theory, vol.16, no.1, pp.21-29, 1981.
- 5) S.Tachi, et al.: Guide DOG Robot-Feasibility experiment with MELDOG MARK III, Proceedings of 11th International Sumposium on Industrisl Robots, pp.95-102, 1981.

- 6) S.Tachi, et al.: Electrocutaneous communication in a guide dog robot (MELDOG), IEEE Trans. on Biomedical Engineering, BME-32, pp.461-469, 1985.
- 7) 小森谷, 館ほか: 離散型ランドマークを使った移動機械の制御, 機械技術研究所報, 37巻, 1号, pp.1-10, 1983.
- 8) 金子, 館ほか: 移動ロボット誘導用データベースの作成方法, 機械技術研究所報, 37巻, 4号, pp.10-20, 1983.
- 9) S.Tachi, et al.: Quantitative Comparison of Alternative sensory displays for mobility aids for the blind, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, BME-30, pp.571-577, 1983.
- 10) 小森谷, 館, 谷江: 移動ロボットの自律誘導の方法, 日本ロボット学会誌, vol.2, pp.222-231, 1984.
- 11) S.Tachi and K.Komoriya : Guide Dog Robot, 2nd International Symposium of Robotics Research, pp.325-332, 1984.

#### 〈テレイグジスタンス〉

- 1) S.Tachi, K.Tanie, K.Komoriya and M.Kaneko : Tele-existence ( I ) : Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proceedings of RoManSy '84 : The Fifth CISM-IFTToMM Symposium, Udine, Italy, June 26-29, pp.245-254, (Kogan Page, London), 1984.
- 2) S.Tachi and H.Arai : Study on Tele-existence (II) Three-Dimensional Color Display with Sensation of Presence, Proceedings of the '85 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Tokyo, Japan, September 9-10, pp.345-352 (North Holland Publishers), 1985.
- 3) S.Tachi et al.: Feasibility experiments on a mobile tele-existence system, Proceedings of the International Symposium on Industrial Robots, November 6-10, pp.625-636, Sydney, Australia, 1988.