テレイグジスタンスの研究

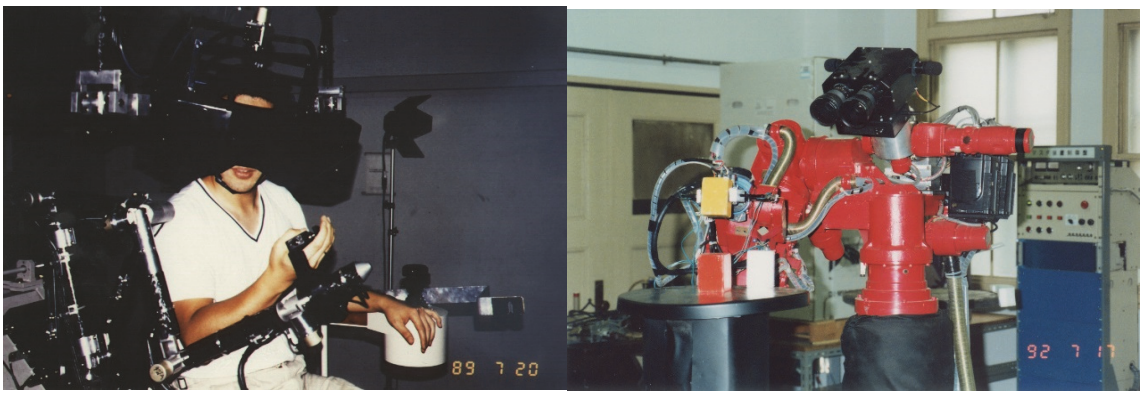
－「テレイグジスタンス」の概念の提唱とその工学的実現可能性の実証－

舘（たち）　暲（すすむ）

機械技術研究所

【概要】

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世界で初めて提案するとともに、そのアイディ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験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。また、テレイグジスタンスによりロボットの存在する遠隔の実世界の人工現実感をもたらすにとどまらず、コンピュータの生成した VR 世界の人工現実感を生じさせることを理論的かつ実験的に実証した。さらに、インピーダンス制御を用いるテレイグジスタンスの制御法やダイナミックカプリングを利用する新しいマニピュレータの制御法の考案、人間の認知制御特性に関する新しい知見なども得ている。なお、本コンセプトの提唱とともに、ロボットを世代の観点から論じ、来るべき新しいロボットの世代を第三世代として位置付け、その第三世代ロボットのコンセプト(1982 年)を提唱した。これは、大型プロジェクト「極限作業ロボット」の立案の中心的な考え方として採用され、プロジェクトの推進に大きく貢献した。なお、この功績に対し、通商産業大臣賞研究業務優秀者表彰（人間と共存する第三世代ロボットの研究；1988 年 11 月 7 日）を受賞、また日本ロボット学会技術賞（テレイグジスタンス技術；1991 年 11 月 28 日）を授賞している[1-5]。



テレイグジスタンス(telexistence)

【テレイグジスタンス小史】

1980 年テレイグジスタンスの概念の提唱：1980 年 9 月にテレイグジスタンス(telexistence=tel-existence : tel=離れて＋existence＝存在)に思い至る[6,7]。図 1 にテレイグジスタンスの概念図を示す。

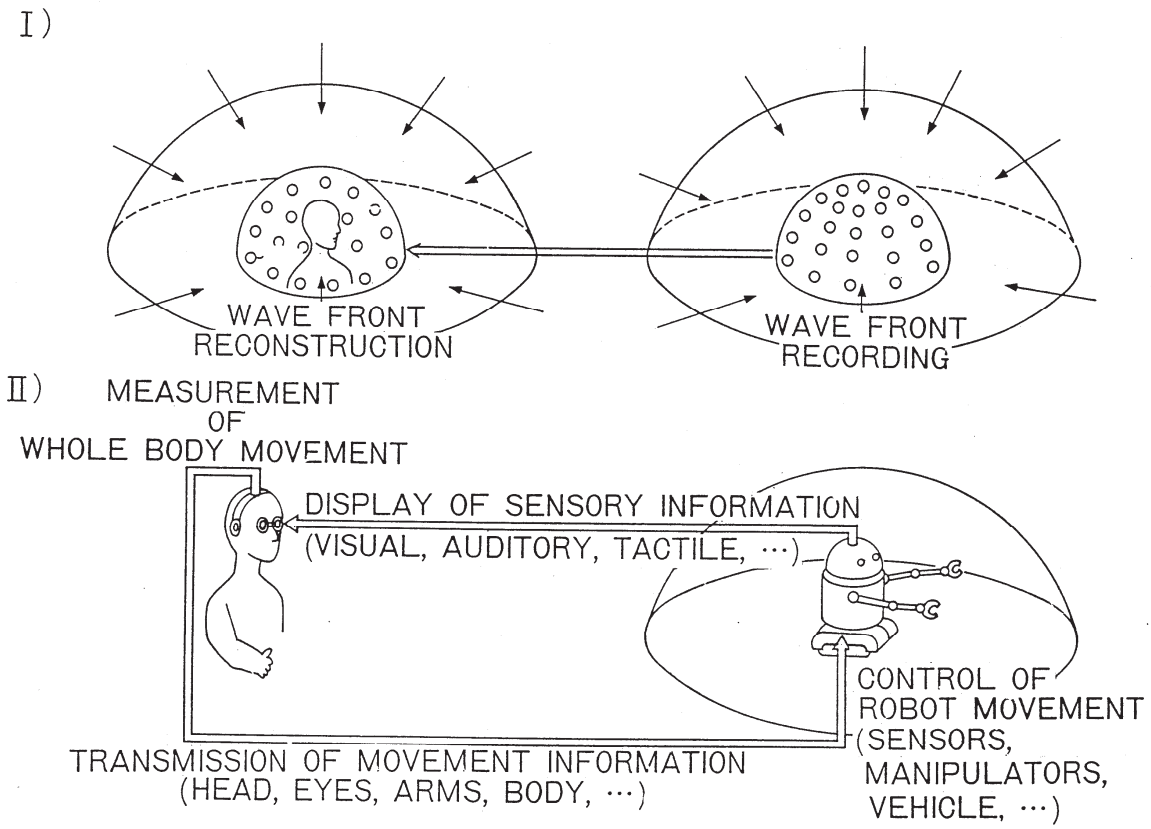


図 1　テレイグジスタンスの概念

1982 年テレイグジスタンス立体視システム：操作者の頭の動きどおりに動き、カメラの映像を操作者に提示するシステムを開発した。81 年の試作当初は視覚だけの装置であった。人間が直接見たときの網膜像と等価になるように設計した立体提示装置が完成したのは 81 年末で、82 年に計測自動制御学会大会論文集に論文が掲載される。これを実験し体験したのは 81 年の末から 82 年の初めであった。このシステムで自分自身を見たときの驚きは今も忘れられない。いわば、初めての幽体離脱ともいうべき体験であった（図 2)。自分自身があたかも幽体離脱したかのように三次元世界に存在し、しかも手を上げたり下げたりしている自分の姿がリアルタイムに観測されたのである。最初は白黒の世界ではあったが、自分自身が自分自身を客体的に観測しているありさまに大変感激した。一生忘れられない感動であった。他の体験者も、カメラロボットがあたかも自分の頭であるかのように「テレイグジスタンス」できたとの報告をしている。さらに、このような主観的な評価にとどまらず、客観的に直接視と同等であることを、ホロプタを用いる心理物理実験で示した[8]。

図 2　テレイグジスタンスで自分をみる

1985 年テレイグジスタンスビークルの開発 : 遠隔からでも、あたかも移動ロボットに乗り込んだような感覚で移動制御できるテレイグジスタンスシステムを開発。自分が車の運転手になった感覚で移動し障害物を回避できた（図 3)。

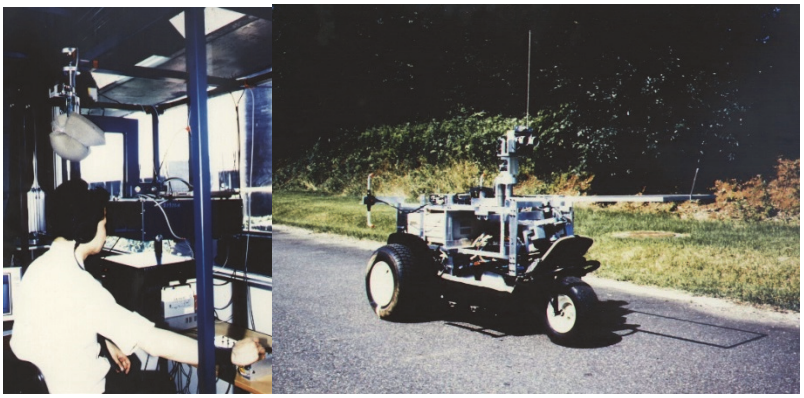


図 3　移動ロボットへのテレイグジスタンス

1989 年 TELESAR の開発 : ロボットの中に入り込んだような臨場感覚を得ながら、ロボットを自分の分身のように自在に制御できる人間型ロボット TELESAR (Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot) を開発。ブロックを積んだり、卓球の球を打ったりする作業が自分で直接行っている感覚で行えることが確かめられた[9]。また、実空間に加えてバーチャル空間へのテレイグジスタンスも可能となった（図 4)。

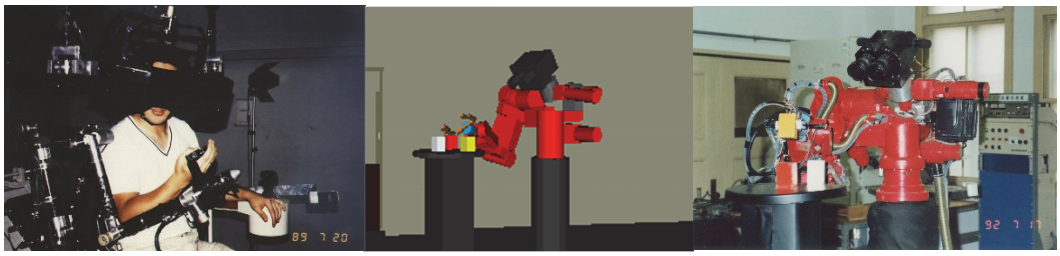


図 4　人間型ロボット TELESAR へのテレイグジスタンス

【テレイグジスタンス発見の瞬間】　（バーチャル・テック・ラボ　p.102 より）

そもそもの始まりは客員研究員として滞在した MIT での研究生活を終え、筑波の研究所に戻ってきた 1980 年の夏であった。日本で生まれた世界初の盲導犬ロボットの研究はまさに大詰めを迎え、MIT での成果を盛り込みつつ心血を注いでいた。 MIT では、ボストンアームで高名なマン教授とともに模擬装置を利用する盲人の歩行補助装置の系統的かつ定量的な評価方法を提唱し研究を行った。

その MIT での研究と日本での盲導犬ロボットの研究の新たな展開としてテレイグジスタンスに思い至ったのは、その年の初秋のある日の朝、研究所の廊下でのことだった。所詮人間の視覚は波動に基づいており、結局二つの目の網膜に映し出された２枚の映像だけしか人間は利用していない。ただ、時々刻々の変化を能動的に捉えそれから三次元を再構成しているのだという事実を再発見した瞬間だった。

直接視で得られるのと同一の網膜像を計測と制御の力で人間に与え続ければよい。その瞬間それまでのもやもやが、一瞬のうちに霧散するのを感じて軽い身震いさえ覚えた。すぐ研究室に戻りノートに向かって溢れるように浮んでくる考えを次々とまとめていった（図 5）。驚くべきことではあるが、視覚提示の原理も同時にいわば大悟した。

テレイグジスタンスに思い至って世界に対する見方が一変した。テレイグジスタンスと人工現実感は人間の時空の制約を解放するであろう。存在とか現実とかの本質に迫るということもあながち絵空事でもあるまい。

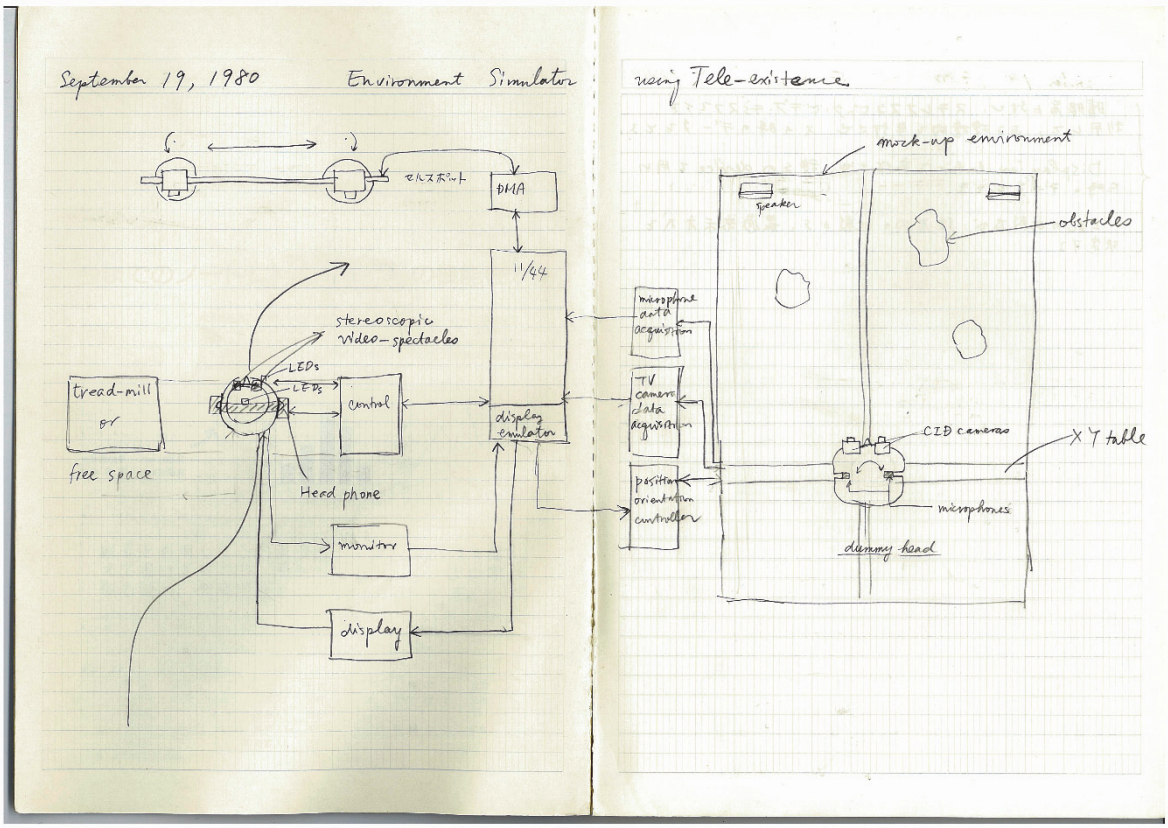


図 5　テレイグジスタンス発見時のアイディアのスケッチ

【テレイグジスタンスはいかにして生まれたか　（人工現実感　pp.148-155 より）】

テレイグジスタンスは日本で独自に考えだされたのだが、どうしてそのような概念が生まれたかということを紹介してみたいと思う。

もともと、私は「盲導犬ロボット」という研究をしていた。盲導犬ロボットとは、目の不自由な人の補助をすることを目的として作られて研究されたものである。ロボットによって環境を認識してその情報を人間に伝えながら、目の不自由な人の歩行を手助けするシステムだ。その盲導犬ロボットの研究で、盲導犬ロボットのような補助的な装置が環境情報を得たときに、その情報をどのように人間に提示すれば人間はそれを使って歩行できるか、という問題が発生してきた。

また次のような問題も重要になった。たとえば 3 メートル先の左側に自動車が駐車してあるとか、あるいは人が 1 メートル前方を同じ方向に歩いているとか、十字路が 10 メートル先にある、などという情報を盲導犬ロボットなどの歩行補助装置が人間にどう教えるかという問題である。それらの情報を音や皮膚刺激などの不自由な人の残存感覚を介して、適切に伝えなくてはならない。そういった伝達方法がいわゆる目の不自由な人のための、補助器の設計法になる。別の言い方をすれば、どういう情報をどのように教えると人間が自由に歩けるかということを知りたいわけである。ところが、その方法が確立されていなかった。情報をどう伝えれば人間が歩きやすいか、それを調べることさえ難しかったのである。

当時の装置というのは、全て「こんなふうにするといいかな」とだれかが考えついて、その考えついたアイディアを利用して装置を設計し、使ってみて具合が悪いと直すということを繰り返していた。そのような方法だと、設計してから作って、作ったものを利用してみて、また作りなおすという繰り返しで時間がかかる。またそのできた装置が、評価をした人には使いやすくても、別の人が使おうと思うとうまく使えなかったりする。そこで、もっと組織的に万人に使いやすい装置を設計すると同時に、実際には使用者一人一人に適した装置を作るという必要がある。ところが、実際のものを作ってこのようなプロセスを踏むのでは時間的や経済的な面だけでなく、設計開発を行う方法論すらなく、言うは易いが、行おうとすると、とてもできないという現実がある。

そこでそれを解決するひとつの方法として考え出されたのが、コンピュータを使って人間に歩行のための情報を伝達するシステムを作って、それによって擬似的に人に歩行情報を系統的に変えながら提示して、その評価を行おうという考え方であった。ロバート・W・マン教授という、ボストンアームという世界で初めて実用化された筋電制御型の義手を開発した高名な先生が、MIT（マサチューセッツ工科大学）にいた。私は 1979 年から 80 年にかけて MIT でマン教授と一緒に研究をしていた。その研究は次のような考え方に基づいていたのである。

これは、「基本的には装置を実際に作るわけではなくて、仮想的に伝達方式を作ってそれによって情報を人間に伝える。それで個人への最適化もするし、みんなに使いやすい装置に仕上げることも行えるようにする研究」であった。もう少し詳しく説明すると、MIT 時代に考えていたのは次のようなことである。補助装置を使って実際と同じような実物大の模型の空間を人が歩く。その時の人の運動を計測する。補助装置はコンピュータでシミュレーションして、人間の動きから、いまどのような環境の情報を補助装置が得ているかを計算する。そして、その情報を、考えられるさまざまな方法で人に伝える。その伝え方を変えてみてその時の人の歩行の方法を測定する。それを系統的に繰り返すことにより、どのような情報をどのように人に与えれば人が歩きやすいかが、人の歩行の仕方を評価することにより定量的にわかってくるわけ

である（図 6）。

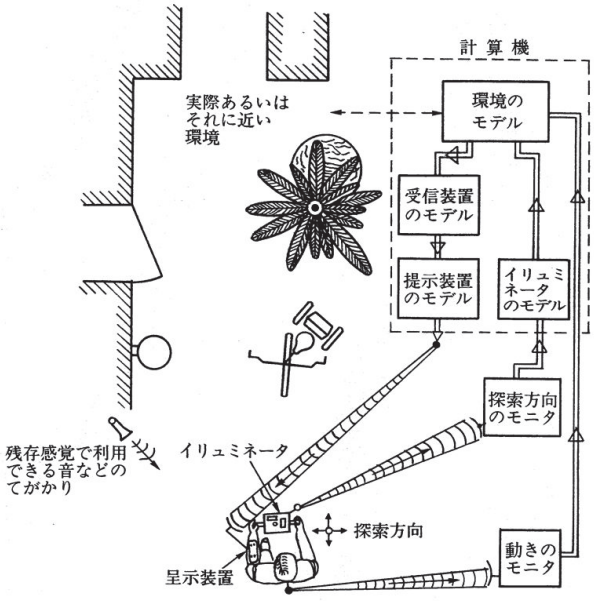


図 6　人間・装置・環境シミュレータ

1980 年の夏に帰国して、それをもう少し発展させてみた。この方法は画期的な方法ではあるが、しかし短所もある。つまり実際の空間を歩けば、物にぶつかったときには危ない。それに実際の空間というのはなかなか変えられない。そうすると、一回動いてしまうと同じ空間なら、今度は補助装置がなくても歩けてしまうわけである。

それではいけない。いろいろと空間の方も自由に変えながらもしっかりと補助装置の評価をしたい。そこで、コンピュータのようなもので空間を自由に変える必要がでてきた。このようなことがひとつの発想となって、コンピュータでバーチャル空間を作って、そこを歩きまわるというようなことを考え出したわけである。しかし、その当時は、バーチャルリアリティという言葉も生まれる前であり、コンピュータで補助装置も空間も全部作り出すのは、たいへんだった。

そこでその次の段階として考えたのが、コンピュータで全部作るのではなく、空間は実際に作るけれども、人間が歩くと危ないのでロボットにその中を歩かせる。そして、自分は安全なところで歩いてその人間の動きをロボットに全部伝えて、そのロボットを動かす。そしてそれを使って評価すれば、何かにぶつかって危ないというようなことは人間自身には起こらないし、自分がここにいながらにして向こうにいるロボットのところに自分がいるような感覚で歩ける。さらにこの方法の良い点は、目の不自由な人だけではなくて目が見える人がどう歩いているかというようなことの研究にも発展させられる点であった。

つまり、ロボットに視覚を与えて歩かせる。目の見える人でもロボットの方の視覚をずっと悪くしてくると、だんだん見えなくなってくる。そうするとその動き方がどう変わるか。そのときにどういう情報を抽出して人間に与えれば人間がうまく歩けるか。そういう研究が可能になると考えて装置を考案した。それを「盲人用歩行補助器評価装置」の特許として提案したわけである（図 7）。

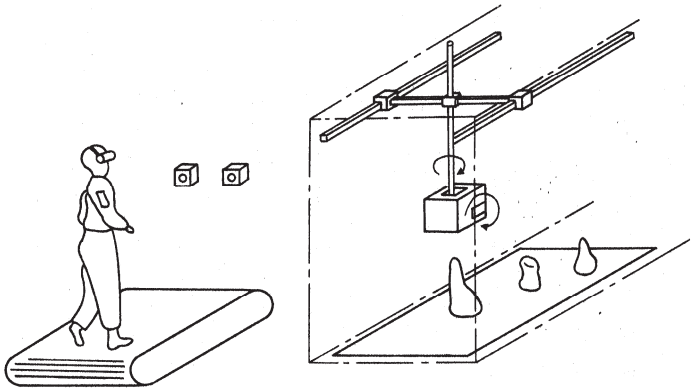


図 7　盲人用歩行補助器評価装置(1980.12.26 出願)
科学技術庁長官選定第 42 回注目発明(1983.4.18)

それと同時に、このようにロボットを別の空間で動かすということは、自分の代わりであるロボットを用いていろいろな作業ができるのではないかと発想した。われわれのところはもともとロボットを研究しているグループであり、ずっと以前からテレオペレーションを熟知していた。この技術を使うと、それまでテレオペレーションとして考えられていたものが、新しいステップを昇るわけである。この方法ならば、今までのテレオペレーションとは違ってオペレータがあたかもロボットのいる場所にいるような感覚で作業ができて、能率的にそして飛躍的に作業が進展するということに思い至った次第である。それが 1980 年の暮れぐらい。そのようにしてマニピュレーションに関する「感覚情報呈示機能をもったマニピュレータの操縦方法」の特許が生まれたのである（図 8)。

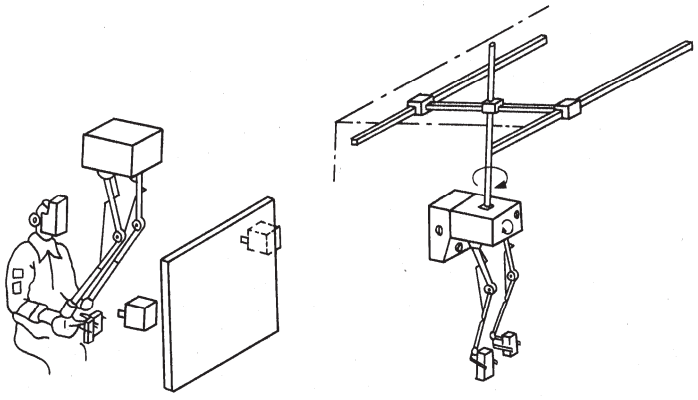


図 8　感覚情報呈示機能をもったマニピュレータ(1981.1.11 出願)

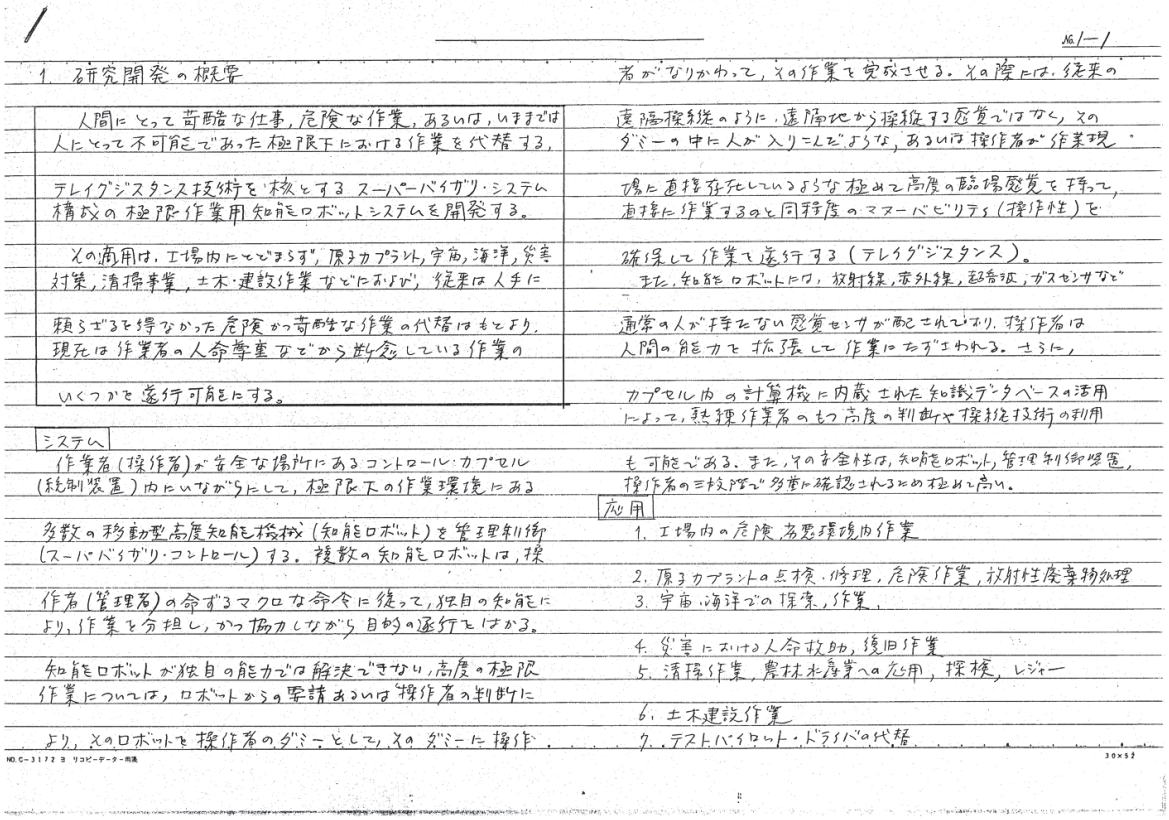
以上のような経緯があって、「テレイグジスタンス」という概念が生まれたのである。しかも、それがちょうど極限作業ロボットという 1983 年からスタートするプロジェクトとあいまった。極限作業ロボットのプロジェクトを興すための準備が進むうちに、「テレイグジスタンス」が非常に重要なテクノロジーだというように通産省の機械情報産業局でも認識され、それが極限作業ロボットのひとつの中核技術として認められ、育っていったわけである。もっとも逆に、ひとつのキーテクノロジーとしての「テレイグイズタンス」を中心として大型プロジェ

クト「極限作業ロボット」が起きたということもいえる。因みに最初の学会発表は 1982 年の 7 月に開催された計測自動制御学会の学術講演会で行われた。この時に世界で初めて「テレイグジスタンス」という概念が学問の世界に登場したのである。

このような経緯からもわかるように、アメリカの「テレプレゼンス」とはまったく独立の流れとして「テレイグジスタンス」が生まれたわけである。アメリカでも同じようなころに、宇宙開発を中心としてミンスキーなどがアイディアを出して、「テレプレゼンス」が育っていったのは歴史の偶然とはいえ、おもしろいことである。やはり技術はそれが生まれ育つタイミングというものも内包しているのかもしれない。

【大型プロジェクト「極限作業ロボット」】

ちょうどそのころ通産省で大型プロジェクトを模索していた。1960 年にエンゲルバーガーが「ユニメート」というロボットをつくり黎明期を拓いてから 20 年たった 1980 年はまさにロボット元年とも称され、日本はロボット王国とまでいわれていた。しかし、80 年に活躍していたロボットは、いわゆる第一世代のプレーバック・ロボットで、工場内に第二世代のロボットが少し出てきたというような状況であった。私がテレイグジスタンスを研究しているのを知って、話をするよう通産省の人から依頼された。私がいろいろな構想を述べると、それをまとめて通産省に持参するようにいわれ、休みを返上して提案書（図 9）を書いた。この提案書がもとになって、1983 年に「極限作業ロボット」のプロジェクトが発足したのである。



1. 研究開発の概要

人間にとって苛酷な仕事，危険な作業，あるいは，いままでは人にとって不可能であった極限下における作業を代替する，

テレイグジスタンス技術を核とするスーパーバイザリ・システム構成の極限作業用知能ロボットシステムを開発する。

その商用は，工場内にとどまらず，原子力プラント，宇宙，海洋，災害対策，清掃事業，土木・建設作業などにおよび，従来は人手に頼らざるを得なかった危険かつ苛酷な作業の代替はもとより，現在は作業者の人命等確保などから断念している作業の

いくつかを遂行可能にする。

システム

作業者（操作者）が安全な場所にあるコントロール・カプセル（統制装置）内にいながらにして，極限下の作業環境にある多数の移動型高度知能機械（知能ロボット）を管理制御（スーパバイザリ・コントロール）する。複数の知能ロボットは，操作者（管理者）の命ずるマクロな命令に従って，独自の知能により，作業を分担し，かつ協力しながら目的の遂行をはかる。

知能ロボットが独自の能力では解決できない，高度の極限作業については，ロボットからの要請あるいは操作者の判断により，その ロボットを操作者のダミーとして，その ダミーた操作者がなりかわって，その作業を完成させる。その際には，従来の遠隔操縦のように，遠隔地から操縦する装置ではなく，そのダミーの中に人が入りこんだような，あるいは操作者が作業現場に直接存在しているような極めて高度の臨場感覚を持って，直接に作業するのと同程度のマヌーバビリティ（操作性）を維保して作業を遂行する（テレイグジスタンス）。

また，知能ロボットには，放射線，赤外線，超音波，ガスセンサなど通常の人が持たない感覚センサが配されており，操作者は人間の能力を拡張して作業にたずさわれる。さらに，カプセル内の計算機に内蔵された知識データベースの活用によって，熟練作業者のもつ高度の判断や操縦技術の利用も可能である。また，その安全性は，知能ロボット，管理制御装置，操作者の三段階で多重に確認されるため極めて高い。

応用

1. 工場内の危険有害環境内作業
2. 原子力プラントの点検，修理，危険作業，放射性廃棄物処理
3. 宇宙，海洋での保守，作業，
4. 災害における人命救助，後旧作業
5. 清掃作業，農林水産業への応用，探検，レジャー
6. 土木建設作業
7. テストパイロット・ドライバの代替

図 9　大型プロジェクト「極限作業ロボット」の提案書

「極限作業ロボット」の開発官室ができて最初の 1 年はそこに併任した。「極限作業ロボット」は、原子力や海洋、石油コンビナートなどで使われる。特に重要だったのが脚式である。それまでの車輪型ではなく脚式のロボットでないと、パイプをまたいだり階段を昇り降りしたりができない。動き回りながら作業するためのアームだけでなくハンドが必要であり、もちろん三次元の視覚や触覚もいる。そういった研究を行って、自律的なロボットを作るというのである。

しかし、自律的なロボットが作業できるのは構造化された既知の環境だけであり、極限作業環境のように構造化されていない環境では、スーパーバイザリ・コントロールが必要になる。ところがスーパーバイザリ・コントロールにも限界があり、やはり人が直接行わなければいけない局面が現れる。しかし、「極限作業ロボット」の働く環境は、危険な場所だったり遠く離れていたりするので、すぐには人が行けない。まさにテレイグジスタンスを有効に使える場面なのである。こういう枠組みを「第三世代の枠組み」とよんだ。つまり、第三世代のロボットである。

その間も研究所に戻って、テレイグジスタンスの研究を続けた。すると、前述のようにアメリカでもテレイグジスタンスの考えが出てきたのである。「テレプレゼンス」である。人工知能の大御所マービン・ミンスキーが、その概念を宇宙開発にあわせて提案した。1983 年のことであった。テレプレゼンスの概念は、ARAMIS 報告書として提出された 1983 年よりもさらに早く 1980 年にでていたということなので、日米同時に概念が生まれたといえる。そして、実際にものをつくって実証したのは私が世界で一番早かったことになる。テレイグジスタンスはそれほど画期的なものであった。

【その後のテレイグジスタンス】

1989 年になり東大に戻って先端研で研究をしないかと誘われた。まだプロジェクトが終わっていなかったので、最初は研究所が主で東大のほうが併任、途中から東大が主で研究所が併任となった。プロジェクトが 1991 年に終わったあと、テレイグジスタンスの装置も先端研に移った。私は研究所と大学の両方を経験することになったわけだが、基本的には連続的であり大きな違いは感じなかった。違いを少し感じたのは、大学は教育と研究を、国の研究所は行政と研究をそれぞれその任とするという点である。しかし、研究という面では両方とも一緒であった。研究自体は、勿論自分が興味を持ち情熱を注げるものでなくては、そもそも研究にならないわけであるが、しかし国の研究所や国立大学である以上、研究は多くの人のためになるものでなくてはならない。多くの人たちがこれは重要だと認める研究をする責務があり、またそのような研究を推進していかなければならないのである。大学に移ってあらためてその思いを強くした。

さて、1990 年になって MIT が世界中の研究者に召集をかけた。工学の様々な分野だけでなく、芸術や心理学などバーチャルリアリティとおぼしきものに携わった最先端の研究者を一堂に集めたのである。サンタバーバラ会議である。バーチャルリアリティという言葉は 1989 年に生まれたばかりで、むしろ「サイバースペース」「テレイグジスタンス」「アーティフィシャル・リアリティ」「バーチャル・エンバイロンメント」などいろいろな名前でよばれていた。

サンタバーバラで一堂に介して、それぞれの研究を発表しあい、ディスカッションするなかで、分野は違うもののねらいは同じだということがわかった。それは何かというと「三次元の空間性」「実時間の相互作用性」「自己投射性」である。そしてこの三つをそなえたものを「バーチャルリアリティ」と統一してよぼうと決めたのである。会議には私もよばれていたがその

とき、テレイグジスタンスとバーチャルリアリティはある意味では全く同一であると喝破した。

そこで同じ年に日本でも人工現実感とテレイグジスタンスの研究会をつくり、翌年国際会議を開催した。ICAT (International Conference on Artificial Reality and Telexistence) である。その後 1995 年に「人工現実感の基礎的研究」が文部省の重点領域研究に認められ、四つの班に分かれて研究を行った。その成果は、4 冊の本として纏められた。こうした領域ができて人工現実感の研究会と一緒になって生まれてきたのが、1996 年に発足した「日本バーチャルリアリティ学会（VRSJ)」である。

1994 年に先端研から工学部の計数工学科に移ったときのことであった。通産省の人が訪ねてきて、これからのロボットについて話しを伺いたいとのことであった。 私は第一世代、第二世代、第三世代の次に、ネットワークとロボットが結びつく時代がくると申しあげた。すでにインターネットを介して、いろいろな情報が自由に行き来しているが、今のネットワークではアクションとかビヘイビアは伝わらない。これからの社会では、アクションとかビヘイビアが自由に伝わるようなネットワーク社会が重要となる。このときの会談がもととなり 1995 年、テレイグジスタンスの考え方にもとづく次世代ロボット構想の「アールキューブ」がまとめられた。

この構想は、ネットワークを介して誰でもがリアルタイムにロボットなどさまざまな機器を自由自在に動かすことのできる社会を目指して技術開発を進めようというものである。つまり、臨場的実時間遠隔制御技術を確立することにより、現在いろいろな情報を自在にやりとりしているのと同様に、人間の行動をも自由自在に伝えていくシステムをつくろうという構想である。それがもとになって、『アールキューブ』という本が書かれた。この構想を一つのビジブルな世界として、それを実現するためにはどうすればよいかが話し合われ、研究計画が進んだのである。その後、1998 年にアールキューブ構想の一環として「人間協調共存型ロボット（HRP)」のプロジェクトが 5 年計画で行われた。

1994 年アールキューブ構想：ネットワークを介してテレイグジスタンスを可能とするアールキューブ(R3：Real-time Remote Robotics)が提唱され、「アールキューブ」構想委員会が通産省（現在，経済産業省）により設置された。また 96 年、構想をまとめた書籍である『アールキューブ』が出版され、その中で「アールキューブ・ストーリー」という SF で、来るべきアールキューブ社会が描かれている（図 10)。

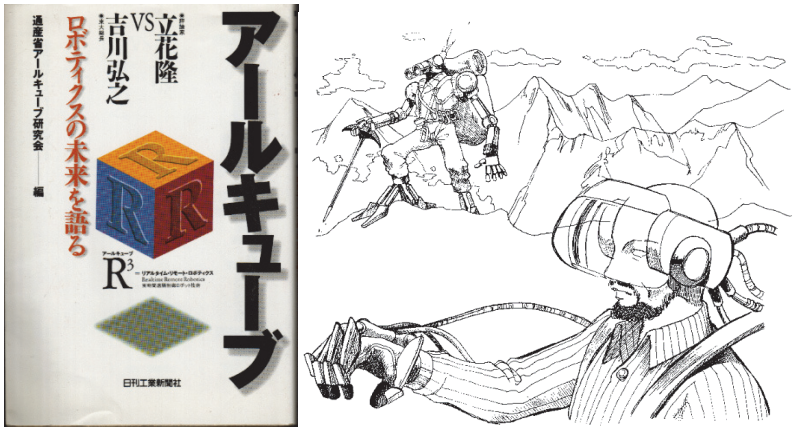


図 10　アールキューブ構想

2000 年人間協調共存型ロボット（HRP)：アールキューブ構想の一環として実施された HRP プロジェクトにおいて、人間型 2 足歩行ロボットへのテレイグジスタンスの実装がなされた[10]（図 11)。

図 11　二足歩行ロボットへのテレイグジスタンス

2001 年ロボットホンの開発：ロボットを人間に対するインタフェースとして積極的に利用することを提案し、人間のコミュニケーションに使用するロボットホンを開発した（図 12)。

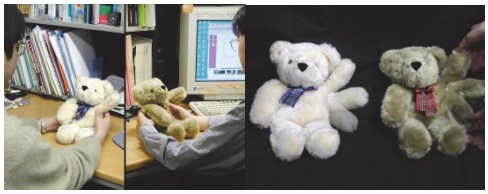


図 12　ロボットホンで動作を伝える

2005 年 TELESAR Ⅱ の開発：操作者の「臨場感」に加えて、遠隔地側で操作者の「存在感」を実装する相互テレイグジスタンスの概念を提唱し、実証システムとして TELESAR Ⅱ を開発した。その人がロボットの中に入っているように見える[11]。なお、TELESAR Ⅱ を用いた相互テレイグジスタンスシステム TELEsarPHONE は、愛・地球博に出展された（図 13)。

図 13　臨場感と存在感を伝える相互テレイグジスタンス

2007 年 TELESAR Ⅲの開発：6 自由度の首機構に両眼カメラが取り付けられ回り込みなどの自由な動作が可能となった（図 14）。

図 14　回り込みによる臨場感と作業性の向上

2008 年 Haptic Telexistence: テレイグジスタンスにおいて触覚が重要であることから GelForce と呼ぶ分布ベクトル力場を計測できる触覚センサを開発し、加えて、その触覚情報を人間に提示するための方法として視覚における三原色と同様の仕組みを触覚にも求める触原色の考えを 2002 年に提案[12]、その解明と実現を経皮電気刺激や振動刺激などの研究を通して行い実装した。また、遭遇型と称する固有受容感覚提示法もあわせ組み込んだ（図 15）。

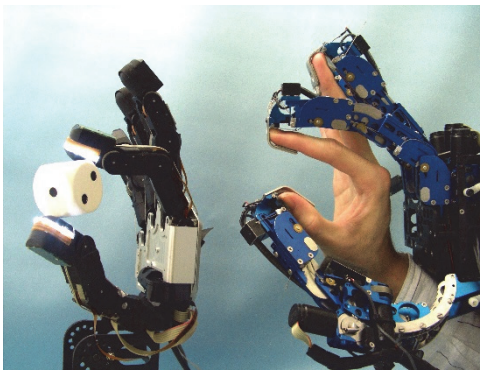


図 15　触覚を伝えるハプティクテレイグジスタンス

2010 年 VR 空間に集う：TWISTER(Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope)という眼鏡なしで 360 度を立体視可能なシステムを研究開発し、それをブースとして、多人数の人がそれぞれ TWISTER を利用し、それぞれが離れたところにいても、あたかも同一場所に参集したのと等価な状態で互いの顔を見ながらコミュニケーションすることを可能とするシステムを研究開発した[13]（図 16）。

図 16　ＶＲ空間に集う

2011 年　：会場へ遠隔参加する TELESAR IV：TWISTER を用いて、遠隔から例えばパーティ会場に遠隔参加することを可能とするシステムを開発した。会場に居る人も、遠隔から参加した人の顔を見ながら、また握手をしたりして親交を深められる[14]（図 17）。

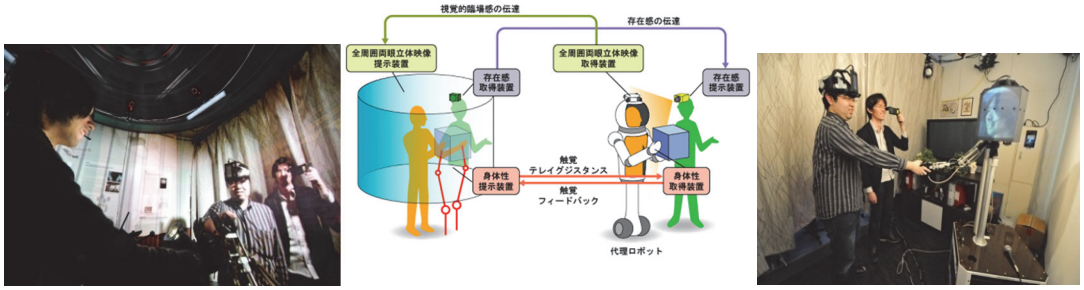


図 17　パーティ会場へ遠隔参加

2012 年細やかな触感を伝える TELESAR V：53 自由度の肢体を駆使した視覚や聴覚の臨場感溢れる伝達に加えて、ロボットが手に取った物の材質や温度などの遠隔環境の細やかな感触を人に伝えることのできる触覚テレイグジスタンスに、2012 年 7 月、世界で初めて成功した[15]。8 月には、米国の SIGGRAPH で展示公開された（図 18）。

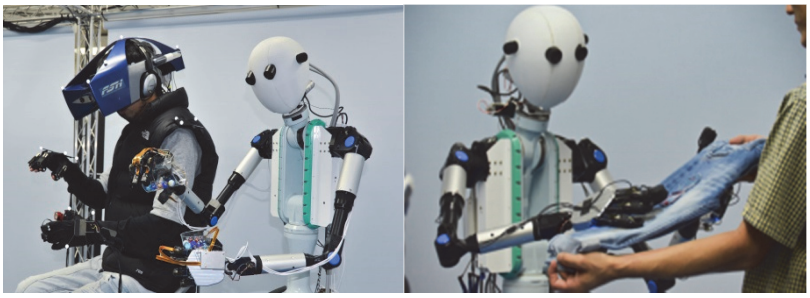


図 18　細やかな触感の伝達

2013 年　：TeluBee の開発：世界中にロボットを配して、誰でもが自在にどこにでもテレイグジスタンスできる社会を目指して研究を進め、その一環として、家庭でも使える簡易型のテレイグジスタンス視聴覚ロボットを開発した（図 19）。

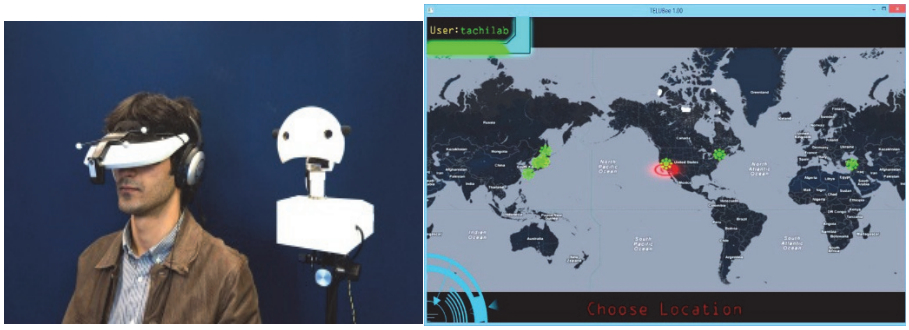


図 19　世界中のロボットに入り込む

2014 年：Flying Telexistence：Drone を分身として自由に空中からのテレイグジスタンスを目指すシステムを開発（図 20）。

図 20　テレイグジスタンスで大空を翔る

なお、これらの一連のテレイグジスタンスの研究に対して、2011 年 4 月 11 日には、テレイグジスタンスの研究業績を顕彰する科学技術分野の「文部科学大臣表彰・科学技術賞（研究部門）」を授与され、また、2011 年 10 月 1 日には、テレイグジスタンスの研究を通して、技術の振興に尽力し特に優れた業績をあげたとして、「東京都功労者表彰（技術振興功労）」をうけている。

【これからのテレイグジスタンス】

現在我が国をはじめ先進諸国では、大都市への人口の一極集中、高齢者の増加と少子化による働き手の減少、移民による文化摩擦や治安の悪化、子育てと労働の両立、通勤に時間がとられ自分の時間が持てないなど、多くの困難な課題を抱えている。

人の移動の概念を変え、実際的な移動を伴うこと無く身体機能を移動させることができれば、この困難を克服することができる。いままでの遠隔からの在宅勤務は、映像や資料、また会話などを伝える遠隔コミュニケーションに限られ、実際にその場に居ないと行えない工場での労働や建設現場の作業などを在宅で行うことは不可能であった。テレイグジスタンスは、五感のみを伝える遠隔コミュニケーションという従来の範疇を逸脱して、人間の身体機能そのものを伝達してしまう画期的な方法である。

身体機能を移動できるテレイグジスタンス社会が実現すれば、人と産業との関わりや社会のありかたが、根幹から変革する。労働環境の問題が解消され、悪環境で働かなくても済む。どんな場所に工場を置いても、仕事をする人を全国、あるいは全世界から集められるため、いままでとは工場の立地条件が革命的にかわり大都市への集中が避けられる。国外の労働者も遠隔から就労できるため、移民問題を解消する。さらに時差を利用することで 24 時間の労働力を複数の国外拠点から確保でき夜勤が不要となる。男女問わず育児しながらの労働参加が可能となり、子育てをしやすい社会となる。

グローバルなビジネスにおける移動による時間的コストも解消する。通勤に伴う移動が不要となり、交通問題を緩和できる。職住近接が必ずしも必要ではなくなり、都市への人口集中が緩和され、ワーク・ライフ・バランスを改善し、本人が住みたい場所に住んで、生きがいのある生活を行えるようになると予測される。

また義体である分身ロボットにより身体機能を補綴・拡張することで、高齢者や障碍者でも若者に体力的に負けず、豊富な経験を活かした労働参加が可能となり労働の質が格段に向上し日本の活力がよみがえる。世界的に一流のスキルを有する技術者・医師等の専門家の招聘も容易になり、職能に応じた人材の最適配置が行える。

将来的には、災害時や非常時の緊急対応を安全な場所から瞬時に行うとともに、常時には、医療や介護、また医師や専門家の過疎地への派遣が行える。また、新たな観光･旅行･ショッピング･レジャーなどの産業創出によって、国民の利便性と生きがいを飛躍的に向上し、クリーンで省エネルギーな社会における健やかで快適な生活が実現されると見込まれている（図 21）。

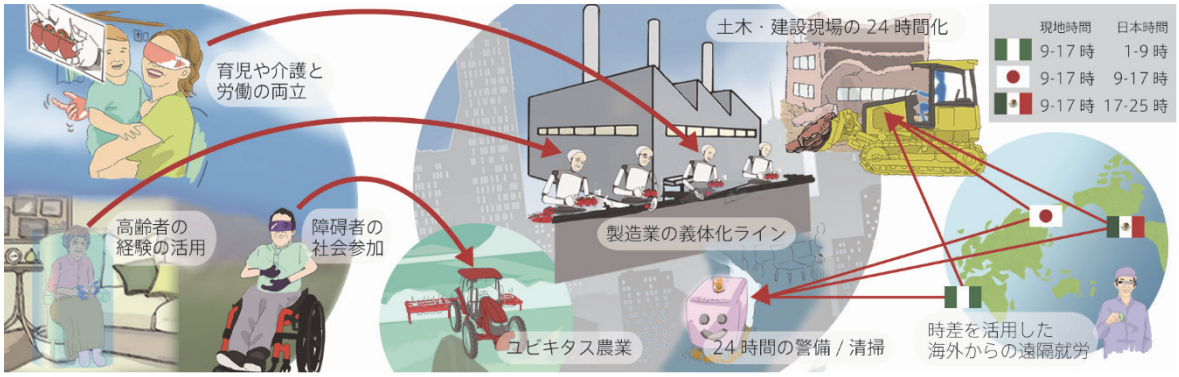


図 21　テレイグジスタンスによる遠隔就労

【参考文献】

[1] Susumu Tachi: Telexistence, World Scientific, ISBN-13 978-981-283-633-5, 2010.

[2] 舘 暲・佐藤 誠・廣瀬通孝（監修・執筆），日本バーチャルリアリティ学会編：バーチャルリアリティ学，コロナ社，ISBN978-4-904490-05-1, 2011.

[3] 舘 暲, 小森谷 清: “第３世代ロボット”，計測自動制御学会誌 計測と制御, Vol.21, No.12, pp.1140-1146, 1982.

[4] 舘 暲: テレイグジスタンス －未来の夢と現在の技術－，日本ロボット学会誌, Vol.4, No.3, pp.295-300, 1986.

[5] 舘 暲: バーチャルリアリティとロボティクス，日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4, pp.512-515, 1997.

[6] 舘暲，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 SICE 学術講演会, pp.167-168, 1982.

[7] S.Tachi, K.Tanie, K.Komoriya and M.Kaneko: Tele-existence(I): Design and Evaluation of a Visual Display with Senstion of Presence, in A.Morecki et al. ed., Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp.245-254, Kogan Page, 1985.

[8] 舘 暲, 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, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.

[9] Susumu Tachi and Ken-ichi Yasuda: Evaluation Experiments of a Telexistence Manipulation System, Presence, Vol.3, No.1, pp.35-44, 1994.

[10]Susumu Tachi, Kiyoshi Komoriya, Kazuya Sawada, Takashi Nishiyama, Toshiyuki Itoko, Masami Kobayashi and Kozo Inoue: Telexistence Cockpit for Humanoid Robot Control, Advanced Robotics, Vol.17, No.3, pp.199-217, 2003.

[11]Susumu Tachi, Naoki Kawakami, Hideaki Nii, Kouichi Watanabe and Kouta Minamizawa: TELEsarPHONE: Mutual Telexistence Master Slave Communication System based on Retroreflective Projection Technology, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.5, pp.335-344, 2008.

[12]舘 暲: バーチャルリアリティにおける触覚の役割，電気学会論文誌Ｅ，Vol.122, No.10, pp.461-464, 2002.

[13]渡邊孝一，南澤孝太，新居英明，舘暲: 全周囲裸眼立体ディスプレイを用いたサイバースペースへのテレイグジスタンス,日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.17, No.2, pp91-100, 2012.

[14]舘暲，渡邊孝一，竹下佳佑，南澤孝太，吉田匠，佐藤克成:再帰性投影技術と全周囲裸眼 3D ディスプレイを用いて存在感と臨場感を実現する相互テレイグジスタンスシステム：TELESAR4，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.1, pp.11-21, 2012.

[15]Susumu Tachi, Kouta Minamizawa, Masahiko Furukawa and Charith Lasantha Fernando:Telexistence - from 1980 to 2012, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp.5440-5441, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012.

[16]舘 暲: テレイグジスタンス，日本ロボット学会誌, Vol.33, No.4,pp.215-221, 2015.

舘　暲　（たち・すすむ）　　東京大学名誉教授

研究開発当時：機械技術研究所、主任研究官、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長

1968 年，東京大学工学部計数工学科卒業。73 年、東京大学大学院博士課程修了、工学博士、東京大学助手。75 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、バイオロボティクス課長，マサチューセッツ工科大学（MIT）客員科学者、東京大学先端科学技術研究センター教授、東京大学大学院情報理工学系研究科教授などを経て、2009 年、東京大学名誉教授。その後 2015 年まで、慶應義塾大学教授･国際バーチャルリアリティ研究センター長などを務めた。2015 年からは，東京大学高齢社会総合研究機構舘研究室に於いて、JST ACCEL 「身体性メディア」プロジェクトの研究代表者などを務めている。盲導犬ロボット、テレイグジスタンス、再帰性投影技術、全周囲裸眼 3D 技術、多視点裸眼 3D 技術、触原色などの研究で世界的に知られる．通商産業大臣賞、文部科学大臣賞、IMEKO 特別勲功賞、IEEE VR Career Award などを受賞。計測自動制御学会第 46 期会長、日本バーチャルリアリティ学会初代会長、NHK 人間講座講師などを務める。

受理日：２０１６年５月２９日