

## ◎総括・展望

## テレイグジスタンスと時空間瞬間移動産業\*

Telexistence and Virtual Teleportation Industry

館 瞳<sup>1)</sup>  
Susumu Tachi

Telexistence is a human empowerment concept that enables a person in a location to virtually exist in another location and act unrestrictedly there. Telexistence was invented in 1980 and is being developed through several research and development projects. Recently, as start-ups specializing in telexistence have been established, momentum has built towards its industrialization and application to a variety of industrial fields. In addition to this trend, the XPRIZE Foundation has launched the ANA Avatar XPRIZE as its next challenge. Intense worldwide competition within the emerging telexistence industry, which integrates artificial intelligence, robotics, virtual reality, and networking, has presently commenced.

**Key Words** Human Engineering／Telexistence, Telepresence, Avatar, Virtual Reality, Virtual Teleportation [C2]

## 1 テレイグジスタンスとは

テレイグジスタンス (telexistence : 遠隔存在) とは、遠隔を意味する tel あるいは tele と、存在を意味する existence を合わせた造語で、人間が自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し、その場所で自在に行動するという人間の存在拡張の概念であり、また、それを可能とするための技術体系である<sup>(1)</sup>。

図1に示すように、自分自身が現存する場所と異なった場所は、実世界でも、コンピュータが生成したバーチャル世界でもよく、後者の場合、すなわちバーチャル世界へのテレイグジスタンスは、バーチャルリアリティ (VR : virtual reality) と呼ばれている。また、実世界へのテレイグジスタンスに、その世界に対応するバーチャル世界を重畳して利用すれば、拡張型テレイグジスタンスとなる。この場合の距離をゼロにしたもののが拡張現実 (AR : augmented reality) になっている。

人間の能力拡張の観点から考察すれば、テレイグジスタンスは人間が新たな身体をもつことにあたる。その身体は実世界ではフィジカルアバターであり、バーチャル世界ではバーチャルアバターとなる。なお、フィジカルアバターはロボット以外の別の人や動物であってもよい。人間以外の生

物を使ったテレイグジスタンスに関しては、ロボット学会に1986年に掲載された「テレイグジスタンス—未来の夢と現在の技術—」<sup>(2)</sup>を参照されたい。2009年に公開されたジェームズ・キャメロン監督による映画「アバター」の世界が、映画公開よりも23年も前に上梓されたこの論文にすでに記載されている。

人間の失った能力を補綴したり拡張したりする概念は、サイボーグと称されている。全身をサイボーグ化する装置としては外骨格型人力増幅器が有名である。これは、ロバート・ハインラインのSFではパワードスーツと呼ばれ、1960年代に米国陸軍とゼネラル・エレクトリックが実際に研究開発し<sup>(3)</sup>、その後、多くのSFやアニメなどの素

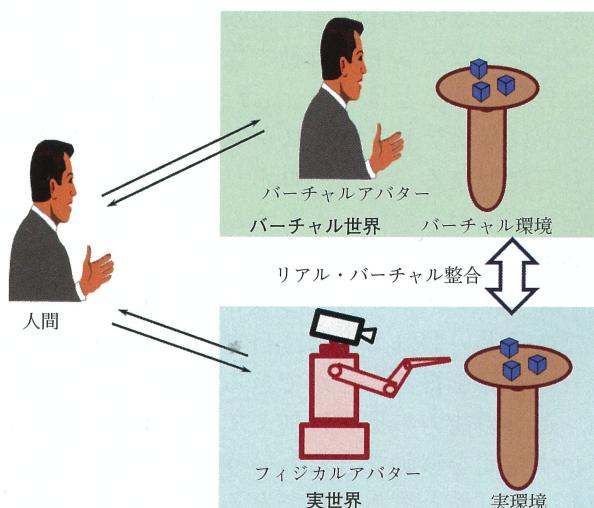


図1 テレイグジスタンスとバーチャルリアリティ

\* 2019年9月2日受付

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構館研究室  
(113-8656 文京区本郷7-3-1)

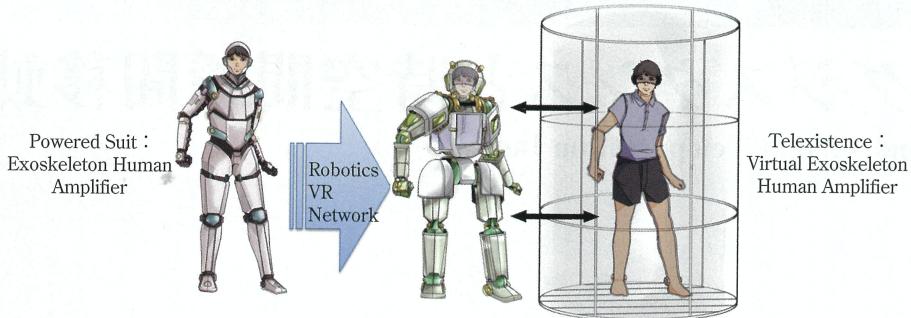


図2 外骨格型人力増幅器とテレイグジスタンス(バーチャルな外骨格型人力増幅器)

材となった。図2の左が、その人力増幅器の概念図である。このシステムでは、人間の各種の能力が人機一体となって補綴されたり拡張されたりする。見えないものを見たり、AIの記憶や判断を活用したり、力を増幅したりすることができる。

しかし、このシステムにはいくつかの欠点がある。一つは、自動的にシステムを動かすことが極めて困難であることがある。ロボットが勝手に動くと人の身体までが動かされてしまう。第二の欠点は、壊れた際に使用者に被害が及ぶことである。第三は、その場に行かないと使えないことである。

それらの欠点を解消したバーチャル(実質的)な、外骨格型人力増幅器が、テレイグジスタンスシステムである。図2の右図のように、使用者は遠隔にいるにもかかわらず、ロボットをあたかもスーツのように着込み、その中に入った状態を実現している。それにより、外骨格型人力増幅器の長所はそのままで、その欠点を補っている。すなわち、人が新しいロボットの身体を手に入れ、その機能を使って自分の身体機能を拡張することができる。その上で、ロボットに自動で作業をさせるときは自分が動くことはない。したがって、複数のロボットに順次テレイグジスタンスして使用することも可能となる。また、ロボットが壊れても人には危害が加わらない。もちろん、その場に直接赴く必要もない。もちろん、その場に直接赴く必要もない。

テレイグジスタンスがしばしば究極のサイボーグであるといわれるのは、自身の身体を失わずに、新しい身体を得ることができると同時に、感覚、知、運動の能力の拡張に加えて、身体的な移動を伴わず空間を移動できるという意味で時空の能力の拡張も可能とするからである。

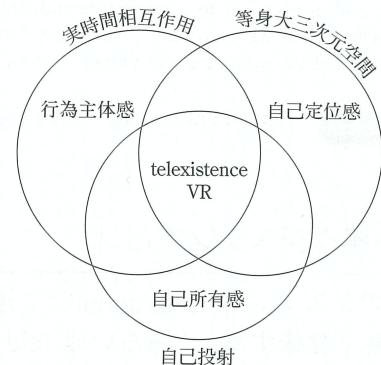


図3 VRとテレイグジスタンスの三要素

## 2 テレイグジスタンスの特徴

バーチャルリアリティとテレイグジスタンスは次の3要素をもつ<sup>(4)</sup>。すなわち、コンピュータの生成する人工環境あるいは、遠隔の実環境であっても、①その環境が人間にとて自然な三次元空間を構成しており、②人間がその中で、その環境との実時間の相互作用をしながら自由に行動でき、③その環境と使用している人間と環境とがシームレスになっていて環境に入り込んだ状態が作られているということである。これらをそれぞれ、「三次元の空間性」「実時間の相互作用性」「自己投射性」と呼び、この3要素すべてを兼ね備えたものが理想的なバーチャルリアリティシステムあるいはテレイグジスタンスシステムである(図3)。

この3要素はシステムとしての要件を表現しているが、使う側の人間の立場に立った要件に読み替えると、自己定位感(self-location), 行為主体感(agency), 身体所有感(ownership)の3要件になる。

自己定位感とは、その人が今位置している新た

な場所に明確に存在していると認知することである。自己の位置定位による位置認識は一人称視点の視覚が支配的である。テレイグジスタンスでは、代理ロボットの視点映像を操縦者の頭部運動に反映させ、操縦者に違和感のない一人称視点の提示を行っている(等身大三次元空間)。

行為主体感とは、ある身体の運動、およびその運動によってなされた行為が、自分自身によって行われているという感覚である。すなわち、この感覚を得るには「自身の行為による結果予測」と「実際にその行為をしたことによる結果」とが合致している必要がある。テレイグジスタンスでは、代理ロボットを時間遅れや位置ずれを感じさせずに追従させている(実時間相互作用)。

身体所有感とは、自己の身体が自己的なものであるという感覚であり、ラバーハンド錯覚(Rubber Hand Illusion)はこの感覚に関する錯覚現象である。操縦者の物理的な身体とアバターとなる代理ロボットの身体間の身体図式を一致させる必要がある。テレイグジスタンスでは、操縦者が代理ロボットへの身体所有感を感じるように、視覚と深部感覚等の自己受容感覚で得られる情報とに矛盾を感じない工夫がされている(自己投射)。

自己の位置定位、行為主体感、自己所有感は、VRでも担保しなければならない重要な要件である。これらの3要件を担保することで、アバター やアバターロボットを自分の新しい身体として感じ、VR空間や遠隔環境で、その身体を自分の新しい身体としての行動が可能となる。

テレイグジスタンスでは、それらに加えて、アバターロボットを自分の身体として行動しつつ、その状態で自分自身を見たときに、いわゆる幽体離脱感覚あるいは体外離脱感覚(out-of-body sensation)が生じる。これはVRにはないテレイグジスタンス特有の現象である。

### 3 研究開発から実用化への潮流

「極限作業ロボット：1983–1991年」「人工現実感：1995–1999年」「ヒューマノイドロボットプロジェクト：1998–2003年」「テレイグジスタンスを用いる相互コミュニケーションシステム：2000–2006年」「再帰性投影技術を用いた相互テレイグジスタンス：2006–2008年」「多人数が自由に行動する実空間への身体性を有したテレイグ

ジスタンス：2008–2011年」「さわれる人間調和型情報環境：2009–2015年」「身体性メディア：2014–現在」などの国家プロジェクトを通して進展してきたテレイグジスタンス技術であったが、ここにきて急速に産業化の兆しが見えてきている。

その発端となったのが、X プライズ財団による ANA AVATAR XPRIZE である。2016 年 8 月 3 日、X プライズ財団のビジョネアーズ・プライズ・デザインというチームが、お台場にある日本未来科学館にある館研究室を訪れた。X プライズ財団は、2014 年に世界の偉大なリーダー 50 人に選出され、イノベーション界のカリスマと評されるピーター・ディアマンデスが 1995 年に創立したもので、これまでに有人弾道宇宙飛行コンテストや、海水からの原油回収など、大規模なプロジェクトを開催している。リンドバーグの大西洋単独無着陸飛行が、人間の移動や観光という新たな領域を爆発的に広げたように、世界規模の賞金レースによって新たな産業を創出する企てであり、現在の民間宇宙産業を創出したのは X プライズの成果であるとされている。

非公開の研究棟にある館研究室の一室で、TELESAR V を体験した彼らはヘッドマウントディスプレイを装着、手袋をつけて体を動かした瞬間、驚きの声をあげた。「まさに、これだ！ これが探し求めていたものだ」<sup>(5)</sup>。それから約 2 カ月後、X プライズ財団はサミットを開いた。

約 300 人のメンターと呼ばれる投資家、学者、実業家、慈善事業家、芸術家、技術者が集まり、次期賞金レースの候補である九つのテーマを 2 日間にわたって審査した。このとき財団から招待され実演したのが、著者らが開発した TELESAR V である(図 4)。その功あって ANA AVATAR XPRIZE が 2016 年 10 月に次期賞金レーステーマに決定したのである。その後、開発目標と評価の詳細が X プライズ財団によりに煮詰められて 2018 年 3 月 12 日に米国テキサス州オースチンで開催された SXSW の会場で正式なローンチが宣言された<sup>(6)</sup>。

予定では、2019 年 9 月末までに世界中からのエントリーを受付、プロポーザルの書類審査で 2020 年 2 月までに 150 チームに絞り、2021 年 5 月に予選大会、20 チームを選定し、2022 年 1 月には本戦が行われる<sup>(7)</sup>。



図4 Xプライズ財団の主催するVisioneers SummitでのTELESAR Vの実演

最先端のテクノロジーである、バーチャルリアリティ(第二世代)、ロボティクス(第四世代)、AI(第三世代)、ネットワーク(5G)が揃って新しい時代を迎えたことにより、テレイングジスタンス実用化の機が、今まさに熟したといえる。このコンテストを奇貨として、異なる複数の場所に人間がロボットの身体を用いて存在し、物理的に物を触ったり作業したりできるテレイングジスタンスの産業化を実現し、時空間瞬間移動産業を生み出そうとしているのである。

この動きの中、新日鉄住金ソリューションズとNTTドコモ<sup>(8)</sup>、トヨタ<sup>(9)</sup>などが、臨場感があり作業も可能なテレイングジスタンスシステム開発を対外発表するに至った。TELEXISTENCE INC.などのテレイングジスタンスを用いる遠隔就労に挑戦するベンチャーも生まれる<sup>(10)</sup>中、ANAは大分県とともにテレイングジスタンスの社会実装実験を始めるなど、テレイングジスタンスの産業化への道が着実に拓きだしている。

#### 4 今後の方向性

人工知能(AI)とテレイングジスタンスは持ちつ持たれつの関係にある。テレイングジスタンスの概念を基軸とした最初の国家プロジェクトが1983年から8年計画で実施された「極限作業ロボット」プロジェクトであるが、その元になる考え方をまとめた論文が1982年に「計測と制御」に掲載された「第三世代ロボット」である<sup>(11)</sup>。下記に、その論文を抜粋引用しながら説明する。

図5に示すように、複数台の自立移動型知能ロボットがコントロールカプセル(統制装置)内の操作者(管理者)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

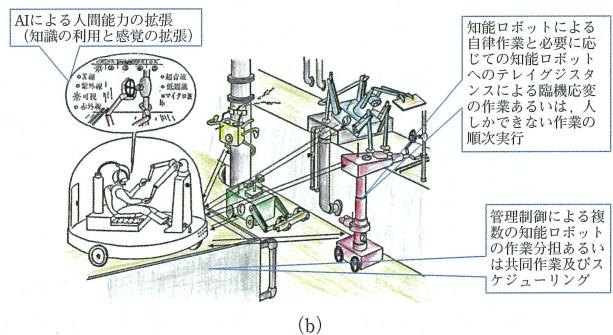
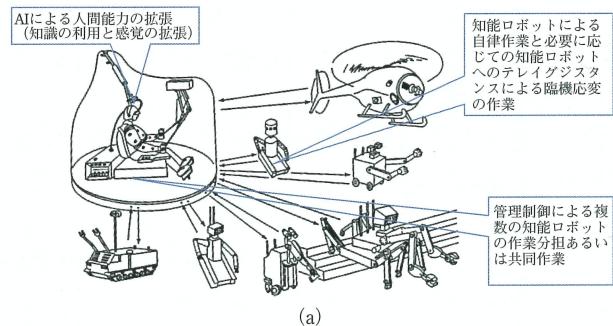


図5 多数の知能ロボットを管理制御し必要に応じてテレイングジスタンスする

がら働いている。その作業分担やプラニングスケジューリングはスーパーバイザリコントローラが受け持ち、各知能ロボットからは、仕事の進行ぶりに関する報告が逐次送られてくる。知能ロボットが、独自の能力では対処しえない困難な作業に直面したとき、ロボットからの要請あるいは操作者の判断で、操作者がそのロボットの中に入って操縦しているような高度の遠隔臨場感と自分の腕を操るに似た高い操作性をもって作業のできるテレイングジスタンスマードに切り替える。その際、知能ロボットの各サブシステムは人の指令によって自由に制御される操縦型ロボットとして働く。

ロボットがもつ放射線、紫外線、赤外線、マイクロ波、超音波、超低周波などのセンサ情報(超感覚情報と呼ぶ)も、操作者が例えば、夜間は赤外センサ情報を可視光に変換して提示して闇の中で物を見たり、超音波情報を可聴周波数に変換して通常は聞こえない情報を操作者が利用したりできる。また、通常の視覚ディスプレイ上に超感覚情報をスーパーインポーズしたり、通常利用しない皮膚感覚チャネルを利用して提示できる。それらの情報を有効利用して操作者は人間能力の拡張をはかれる。また、ロボットの腕の操作性を高めて自分の腕のように制御すれば、通常持てない物が持てるという意味での人力増幅機が実現される

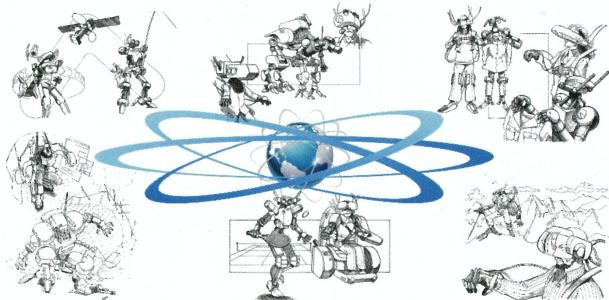


図6 世界中の分身ロボットを皆が自由にログインして使うことになる。

1990年代になって、ネットワークで世界各地に配置されたロボットにログインしては、テレイングジスタンスする構想がアールキューブとして発表された。アールキューブは、ネットワーク環境を利用したパーソナルなテレイングジスタンス社会を目指した研究開発構想とそのための基礎研究と位置づけられる。情報のみが行き交う当時のネットワークを進化させて、ロボットを自在に用いることにより作業の伴うものとする構想であった(図6)。

下記に、日本ロボット学会誌に1997年に掲載された論文から抜粋しながら説明する<sup>(12)</sup>。

このアールキューブが実現されれば、例えば、現在の家庭のパソコンがVR入出力付のVRパソコンになり、それを用いてインターネットを介して世界中のサイトにテレイングジスタンスすることが可能となる。家庭内のパソコンには遠隔のロボットがあたかもコンピュータの端末機器のように接続され、コンピュータの指令で制御されたり、テレイングジスタンスマードでは使用者の目となり耳となって環境を認識し、使用者の意のままに分身のよう行動する。家庭だけではなく、オフィスや工場、病院、学校、図書館、美術館、公園、競技場、アミューズメントパークなど、あらゆるところにテレイングジスタンスロボットが配置されており、人は家庭からでもオフィスからでも、あるいは公衆電話のような公衆アールキューブサイトから世界中のアールキューブロボットを自分の分身として利用できる。

これを用いれば、例えば、病院に永く入院していて外に出られない子供たちやお年寄りが、ほかの子供たちと一緒に遊んだり、自分の家族の住む家に戻ったりすることが、バーチャル(実質的)に可能となるのである。そして、この各地に配置

されたロボットは原則的には知能ロボットである。そのため、人が使用しないときは自動的に決められた仕事を行ったり、人の応対をしたりできる。また、安全知能を備えることにより、使用者が見過ごした危険を回避できる。さらに、使用者が途中でロボットからログアウトしても、自分の元いた場所に自動的に戻ることができる。

最近のテレイングジスタンスの応用展開は、遠隔就労での利用である(図7)。日本ロボット学会誌の2015年の論文から抜粋引用しつつ説明する<sup>(13)</sup>。

今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、実際にその場にい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。テレイングジスタンスは、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ン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方が根幹から変革する。労働環境の問題が解消され、悪環境で働くなくても済む。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、今までとは工場の立地条件が革命的に変わり、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。さらに時差を利用してことで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を解消する。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、高齢者や障がい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

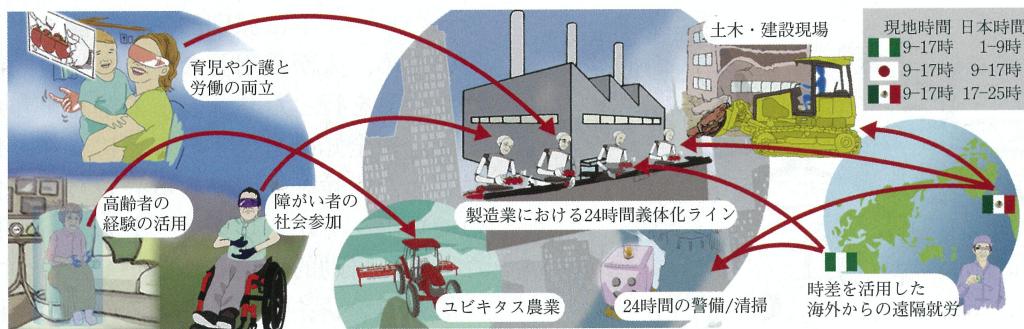


図7 時空間瞬間移動産業の創出とテレイグジスタンスの社会実装を通じて、新たな働き方、生き方、社会のあり方の実現を目指す

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／常時の医療や介護／医師や専門家の過疎地への派遣／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。

さらに特筆すべきは、テレイグジスタンスでの遠隔就労が進めば、人が身体を利用して作業する際のデータが数多く集まることである。それは、ビデオで撮影したデータとは異なり、人がどこを見ながら手にどのような力を加えて作業しているかまでわかるデータである。現在、人の臨機応変で巧みな作業を知能ロボットに教え込むには、いわゆる教師とすべきビッグデータがなく深層学習をもってしても達成できない。しかし、テレイグジスタンスによりそのような作業を世界中の労働者により行っているうちに必要なデータが集まり、知能ロボットに置き換えることが可能となってゆく。その意味でも、テレイグジスタンスは重要な役割を果たす。

## 5 将来展望

2016年はVR元年であるといわれ、ゴールドマンサックスなどは、2020年代にVRがテレビに匹敵する産業になると予測している。この予測や第二次のVRブームが始まると予測される4年前の2012年に、著者は、日本VR学会の基調講演で、歴史的な考察から、3DとVR技術のもつ30年周期を発見し、下記の予想を述べた<sup>(14)</sup>。

「3DとVRという二つの科学技術は大きな関係性をもっています。3Dの歴史を遡って昔から見

ていきますと、30年ごとに3Dのブームというものが起きていることがわかります。そして、その3Dのブームの後に、VRがブームとして出てくるというような流れがあることもわかります。歴史を紐解くと、3Dの最初の登場は19世紀ですが、3Dが黎明期を迎えるのは1920年代を待たねばなりませんでした。黎明期を経て、最初に3Dのブームが訪れるのが1950年代で、3Dという名称もこのときから定着しました。爾来、1980年代に第2次3Dブーム、そして2010年代に第3次3Dブームという流れになります。最初の3Dブームの10年後の1960年代にVRの黎明期、第2次3Dブームの10年後の1990年代に最初のVRブーム、ということから、3Dブームのほぼ10年後にVRのブームが生まれるということが見えてきます。このことから、次の第2次VRブームは2020年代だと予想されるわけあります(館予想)」

その予想どおり第二次のVRの興隆期を迎えつつある現在、また新たな次の潮流がみえてきていく。それが、テレイグジスタンス(アバター)という潮流である。

テレイグジスタンスは、著者が1980年9月19日に着想した概念であり、1982年には最初の装置を作製し発表した<sup>(15)</sup>。その後、40年近い歳月を経て技術が育ちテレイグジスタンスが最初の興隆期を迎えるようとしている。

図8に3D、VR、テレイグジスタンスに関する30年周期を俯瞰している。黎明期とは、関係者は知っているものの一般的には知られておらず、興隆期を迎える、歴史を紐解いたときの原点の時代であり、興隆期を2度ほど迎えて、世の中に浸透してゆくように思われる。

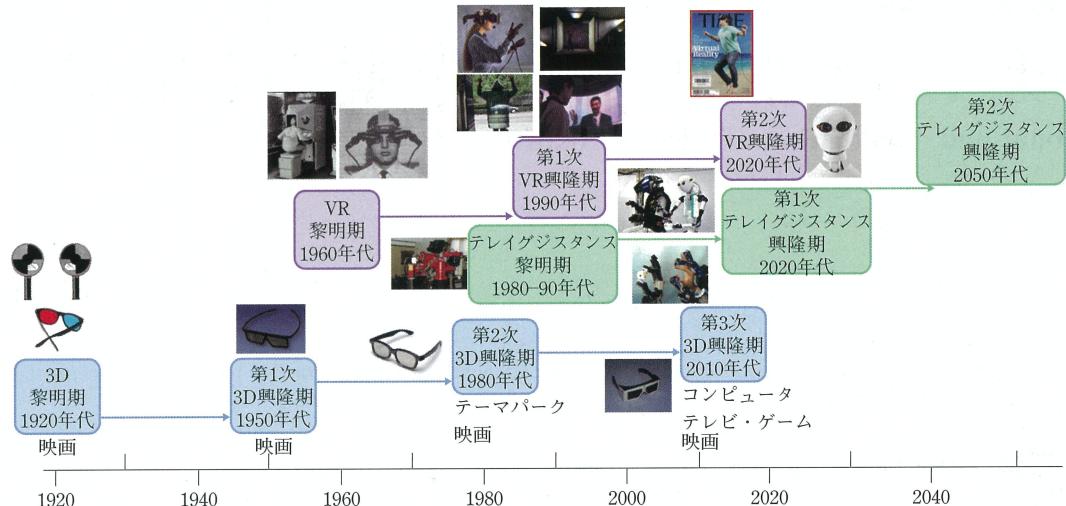


図8 3D・VR・テレイグジスタンスの歴史と将来予想

1980年代から2000年代までの30年間は、テレイグジスタンスの黎明期といえよう。学界では認知されプロジェクト研究などが進んだ一方、社会に実装されブームを起こすまでには至っていない。

現在、世の中の進歩が、まさにテレイグジスタンスに向かって動き出しているといえる。2020年代は、環境、距離、年齢、身体能力など、さまざまな制限にかかわらず自在に瞬時に移動することを可能とする本技術により、時空間瞬間移動産業が生まれ育ち、遠隔就労やレジャーはもとより、例えば医師、教員、熟練技術者が不足している地域や、人間の立ち入りが困難な災害現場等でのアバターの活用等を通じて、社会課題の解決と経済発展の両立への貢献が期待される。さらに、30年周期予想から、2050年代に、再び大きなステップアップが生じて、社会が大きく変わるものと予想される。

## 参考文献

- (1) 館暉: テレイグジスタンスの新展開, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 10, p. 2-6 (2018)
- (2) 館暉: 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, p. 295-300 (1986)
- (3) Ralph S. Mosher : Handyman and Hardiman, Technical Paper 670088, SAE International (1967)
- (4) 館暉: バーチャルリアリティ入門, p. 27, 筑摩書房 (2002)

- (5) 時間、空間、自分、すべての制約を超える働き方を異次元に導く「幽体離脱」のテクノロジー, Forbes JAPAN, No. 46, p. 34-39 (2018)
- (6) <https://forbesjapan.com/articles/detail/20313>
- (7) <https://avatar.xprize.org/>
- (8) <https://www.nssol.nssmc.com/technology/iox-solution/5g-factory-002.html>
- (9) <https://www.youtube.com/watch?v=UB2xrX9gQtA>
- (10) <https://www.forbes.com/sites/japan/2018/01/26/telexistence-how-this-tokyo-startup-is-building-real-life-avatars/#4a2964c14094>
- (11) 館暉, 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, p. 1140-1146 (1982)
- (12) 館暉: 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, p. 512-515 (1997)
- (13) 館暉: テレイグジスタンス, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, p. 215-221 (2015)
- (14) 館暉: 特集 第17回大会 基調講演, 原点回帰—バーチャルリアリティとテレイグジスタンスの将来を見据えて—, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 17, No. 4, p. 6-17 (2012)
- (15) 館暉: テレイグジスタンスと私, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 1, p. 29-30 (1992)

## フェイス

テレイグジスタンスは、時空を走るビークルであるともいえる。それは、時空間瞬間移動産業と呼べる新しい産業を生み出そうとしている。1980年、世界で初めてテレイグジスタンスの概念を提唱、爾来その実現のための研究を行ってきたが、40年の星霜を経て時代が追いついてきたと実感している。これからが楽しみである。



館 暉