

テレグジスタンス研究の現状と社会実装

舘 暲*

1. はじめに

ウイルスは生体から生体へと感染し、生体の体内でしか増殖できないこと、そして、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は人が媒介することから明らかなように、COVID-19の対策に最も有効な手段は、人と人との接触を最大限に減らすことである。しかし、それでは人間の活動が全て停止してしまう。人と人が物理的に接触することなく、バーチャル（実質的）に接触することを可能にできれば、人間の諸活動を継続しつつ、COVID-19などの感染を抑えることができるはずである。その手段の一つが、リモートワークあるいはオンラインとも呼ばれる、在宅勤務など仕事の本拠地以外で働くテレワークにほかならない。

アルビン・トフラーが、その著書『第三の波』で、情報革命の結果、新しい生活様式が可能になるとし、在宅勤務を提唱したのは1980年のことであった。それから40年が経過した現在、これが現実のものになったのである。皮肉にも、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、在宅勤務が広く行われるようになったからである。

しかし一方、コンピュータに向かって執務できる、会議、相談、指示、財務、会計、総務、企画、設計、デザイン、プログラミングなどの、いわゆるホワイトカラーの仕事はテレワーク可能であっても、医療や福祉、水道、電気、コンビニエンスストア（以下、コンビニ）、スーパーマーケット、建設、土木など、社会を根幹で支えるエッセンシャルワークとも呼ばれる仕事の多くは、その場にいる必要があるため在宅勤務は難しく、テレワークに置き換えることができないという大きな問題が顕在化してき

た。そして、この問題の解決こそが、まさにこれからの喫緊の課題なのである。

この課題は、身体を持ったロボットを自分の分身として遠隔から働かせるようにできれば解決できる。換言すれば、移動の概念を、物質の移動から機能の移動に変えるのである。それを可能にするのが、テレグジスタンス（teleexistence, 遠隔存在）である¹⁾。テレグジスタンスとは、人間が物理的に存在する場所とは異なる場所で実質的に存在し、そこで自在に行動するという存在拡張の概念であり、それを可能にする技術体系のことも指す。自分自身が物理的に存在する場所とは異なる場所は、実空間でも、コンピュータが生成したバーチャル空間でもよく、後者の場合、すなわちバーチャル空間へのテレグジスタンスは、バーチャルリアリティ（VR: virtual reality）と呼ばれている。さらに、実空間とバーチャル空間を整合することで、バーチャル空間を介して実空間にテレグジスタンスしたり、実空間にバーチャル空間の情報を付加して行動したりす

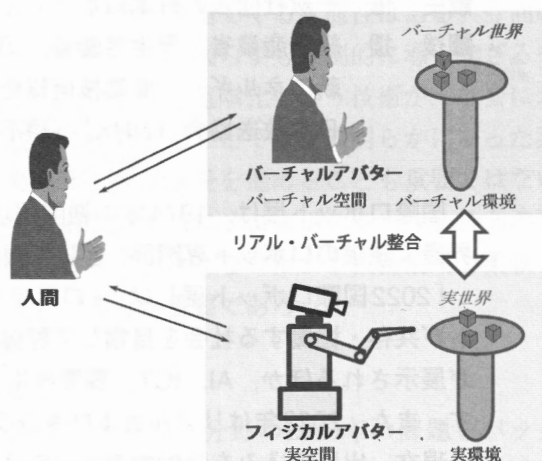


図1 バーチャル空間へのテレグジスタンス、実空間へのテレグジスタンス、及びバーチャル空間と実空間を併せ活用する拡張テレグジスタンス

* 東京大学 名誉教授

ることも可能になる（図1）。

2. テレイグジスタンスの実現とテレイグジスタンスが創る新しい社会

テレイグジスタンスの実現は、ロボットに入り込んだ状態、あるいは、ロボットをスーツのように着込んだ状態をバーチャル（実質的）に作り出すことにより行われる²⁾。図2の左図は、パワースーツや外骨格型人力増幅機と呼ばれるシステムであり、人間がロボット型のスーツを着込み、能力を拡張することで、危険な環境下でも人間の大局的判断や目と手の協調作業などの器用さを失わずに作業を可能にするものである。しかし、このシステムにはいくつかの欠点がある。第一の欠点は、ロボットが勝手に動くことと人の身体までが動かされてしまうため、自動的にシステムを動かすことが極めて困難であり、AIによる自動化との相性が悪いことである。第二の欠点は、壊れた際に使用者に被害が及ぶことで、第三の欠点は、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機が、テレイグジスタンスシステムである。図2の右図の中央が使用者である。複数台の自律型知能ロボットとつながっている。そのうちの1台（左側）をテレイグジスタンスで利用する。使用者は遠隔にいるにもかかわらず、その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する。それにより、外骨格型人力増幅機の長所はそのまま、その欠点を補える。すなわち、人間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、残りの自律型知能ロボット（右

側のものだが複数あってもよい）を、自身が動かされることなく、自動で作業させることができるのである。逆に、左側のロボットを自動モードにして、右側のロボットにテレイグジスタンスすることもできる。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が可能になる。さらに、ロボットが壊れても人には危害が加わらず、もちろん、その場に直接赴く必要もない²⁾。

この実現には、ロボティクス、AI、バーチャルリアリティ（VR）、ネットワークの全ての技術の進展と統合が必須であったが、現在、それらの技術がテレイグジスタンスを実現するに十分なくらい進展してきている。まさに機が熟してきているといえよう。

テレイグジスタンスを普及させ、身体的な作業も遠隔でできるようにすれば、現在は通勤を余儀なくされている多くの職種でテレワークが可能になる。そうなれば、都心から離れて家で働くこともでき、子育てや介護に忙しく長時間勤務ができない人でも働きやすくなり、また、高齢者もロボットを自分の新しい身体として使うことにより、身体の衰えをカバーして働けるようになる。

また、世界中のどこからでも身体を使った労働ができるようになるため、仕事のために家族と離れて外国に移住する必要がなくなる。また、24時間労働が必要な職場では夜勤をなくし、時差を利用して昼間の国の人たちに働いてもらうことが可能になるのである。もちろん、テレイグジスタンスは、観光やショッピング、レジャーなどの業界にも大きな変革をもたらし、「時空間瞬間移動産業」といった新しい産業分野を形成するに至ると考えられている（図3）³⁾。

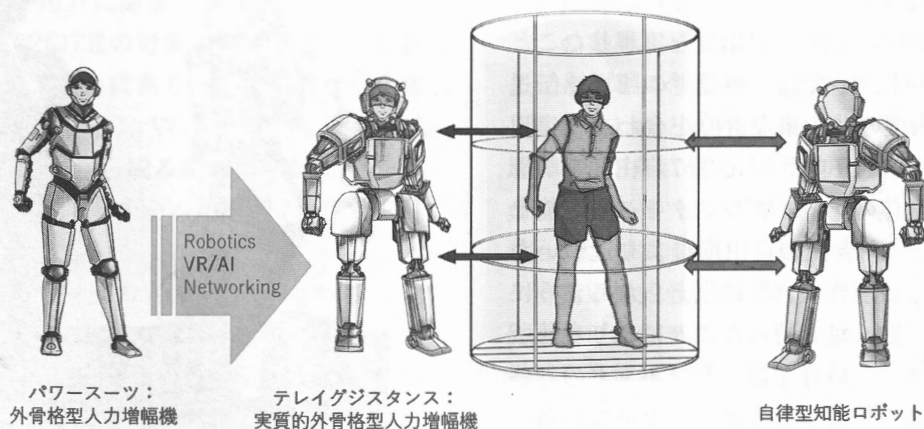


図2 左：外骨格型人力増幅機 右：テレイグジスタンス（実質的外骨格型人力増幅機）

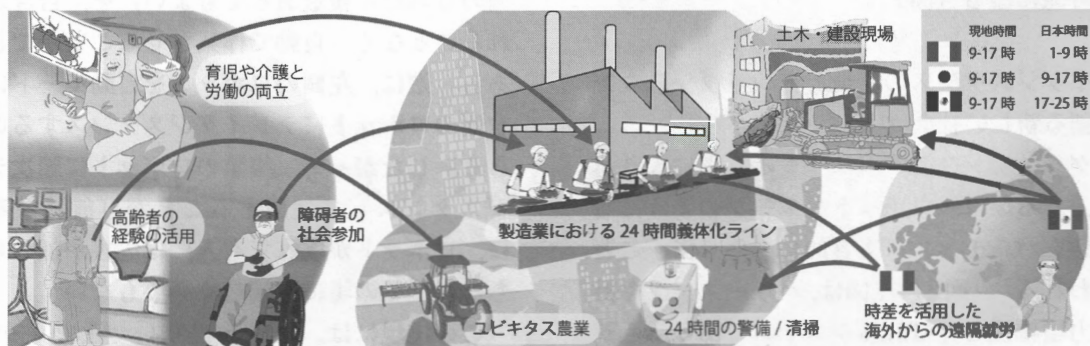


図3 時空間瞬間移動産業の創出とテレグジスタンスの社会実装を通じて、新たな働き方、生き方、社会の在り方の実現を目指す

3. テレグジスタンスの現状

著者は、1980年9月にテレグジスタンスを着想し^{4,5)}、以来、多くの研究プロジェクトを通して実機システムを構築し、テレグジスタンスの実現可能性と有効性を実証してきた。それらは主に、「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：2014-2019」などの国家プロジェクトである。

図4は、JST ACCEL「身体性メディア」プロジェクトで構築した最新のテレグジスタンスアバターロボット「TELESAR VI」⁶⁾である。TELESAR VIの特徴は、テレグジスタンスロボットとしては世界に類いのない頭部3自由度、胴体6自由度、腕左右7自由度ずつ、脚部6自由度ずつ、さらに左右のハンドに16自由度ずつの、都合67自由度を実現したことにある。TELESAR VIでは、視聴覚の臨場感伝送と人間の134自由度の非拘束な計測を合わせて実現することで、AVATARロボットの67自由度を制御しての、全身の身体のテレグジスタンスを可能としている（図4, 5）。人間の自由度により近づいたことで、人間らしい所作が自然に伝えられるようになり、意のままに動く足を持ったことにより身体所有感が大幅に増大し、自身が新たなロボットの身体を持ったことがより体感できるようになっている。

また、ハンドの制御において、従来の角度のみを伝える方法では人間の手とロボットのハンドの形は

似るものの、指先の間隔がずれてしまい作業に支障が生じる場合が多々あったが、TELESAR VIでは、親指と他の指の間のベクトルに注目し、それらをマスターとスレーブで一致させる新しい制御法を考案し導入して前記の問題を解決している。

さらに、アバターロボットTELESAR VIの10本の指先全てに、力センサ、加速度センサ、温度センサを埋め込み、加速度センサ情報を処理することで振動情報を得て、触原色としてセンシングする仕組みになっている。これらの情報を指先で束ね、指に沿ったハーネスで触覚伝送基板に伝え、そこから、Ethernet接続により10本分のデータをまとめて本体のコンピュータに送り、そこから使用者に伝送することができる。一方、使用者側の触覚の提示システムとしては、各指に、振動と温度を提示する2原触素子と力提示デバイスを配置して触原色として提示している。力提示デバイスは、指パッド、糸、糸通しと小型モータで構成されている。指パッドは

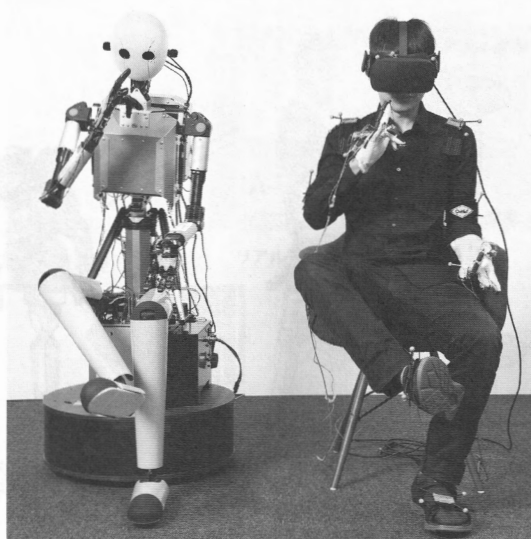


図4 テレグジスタンスアバターロボット TELESAR VI

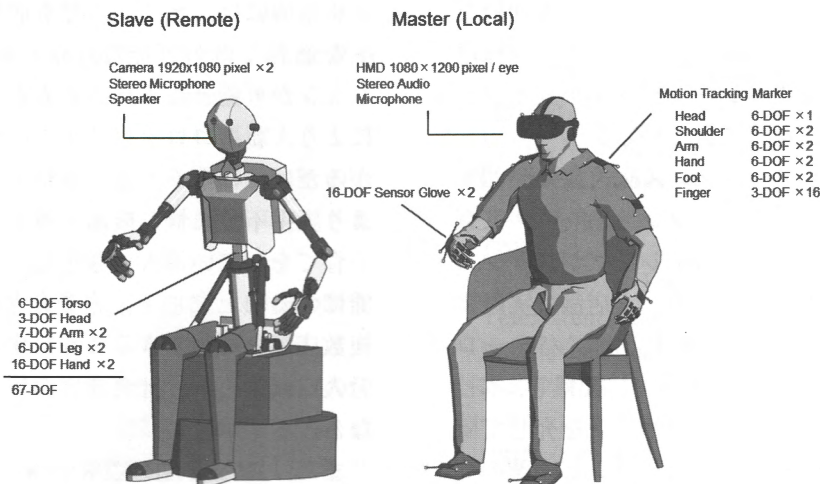


図5 TELESAR VIのシステム構成

モータの力で引っ張られ、最初に指を変形させ皮膚感覚による力感覚が生じ、さらに大きな力で引かれると、指関節に力がかかり関節包などの固有受容器による力感覚が生じる仕組みになっている。これにより、触原色原理に基づく、触覚のセンシング、伝送と提示が10指全てで可能となった^{6,7)}。

4. テレイグジスタンスの社会実装

40年近く長く研究開発段階にあったテレイグジスタンスは、2007年頃からテレプレゼンスという名称で米国において商品化され始めた。ただしこれらは、移動可能なSkypeともいえるべきもので、コミュニケーションはできるものの臨場感がなく、また作業をすることはできなかった。そのような状況の中、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・ディアマデス氏が1995年に創立した、非営利組織であるXプライズ財団が主催するコンペVioneers Summit が2016年10月に開催された。当該サミットの目的は、次のXPRIZEの対象テーマを九つの候補テーマの中から選ぶことにあり、学識経験者や企業のCEO（最高経営責任者）、VC（ベンチャーキャピタル）の決定権者などから成る約300名のMentorと呼ばれる審査員により、9チームの提案テーマが2日間かけて審査された。

著者はXプライズ財団のAvatarチームから、「世界で最も進んでいるAvatarであるTELESAR Vの実演をVioneers Summitで行って欲しい」旨の要請を受け、2日間にわたり実演を行った（図6）。その結果、他のテーマを押し付け、Avatarが次期XPRIZEのテーマとして選定され、世界中からの参

加者によるAVATAR XPRIZEに向けての競争が開始されるに至ったのである⁸⁾。財団はこの競争を通して、時空間瞬間移動産業ともいえるべきVR、ロボティクス、AI、ネットワーク等の最先端のテクノロジーを用い、複数の場所に人間がロボットの身体を用いて存在し、物理的な作業までを可能とするテレグジスタンスの産業化を目指している。



図6 Xプライズ財団が主催するVioneers SummitにおけるTELESAR Vの実演

この動きに呼応するように、2017年にはテレイグジスタンスの産業化を目指す、テレイグジスタンス株式会社などのベンチャー企業が生まれるに至った⁹⁾。2018年になると、KDDI株式会社、新日鉄住金ソリューションズ株式会社（現：日鉄ソリューションズ株式会社）と株式会社NTTドコモやトヨタ自動車株式会社などの大手企業も、臨場感があり作業が可能なテレイグジスタンスを指向した製品を目指したプロトタイプを公表し始めたのである。

そのような中、着実に社会実装が始まっている。コンビニなど社会を支えている社会インフラともいえる業種において、商品検品・陳列業務を遠隔操作

化・自動化することで、店舗の省人化や、物理的な店舗立地に制約されない自由度の高いスタッフ採用が可能で、新しい店舗オペレーションがテレグジスタンスにより可能になってきている。

その好例が、テレグジスタンス株式会社が2020年9月14日に開業した、「ローソン Model T 東京ポートシティ竹芝店」におけるテレグジスタンスによる商品陳列作業の実施である。実店舗で実際に導入し、運用した点が特筆に値する。アバターロボット Model-T を店内バックヤードに配置し、本社オフィスなどの遠隔からインターネットを介して陳列作業を行っている。具体的には、コンビニ業の売上で大きな割合を占めるペットボトル・缶飲料、及び弁当・おにぎり・サンドイッチなどの中食を対象とした商品陳列をテレグジスタンスにて行う。

アバターロボット Model-T は、コンビニなど狭い小売店舗空間内で商品陳列作業を行えるよう、胴体とアームに22自由度を有している。ロボットと操縦者間の映像伝送において、ロボット側のカメラから操縦者側のディスプレイに表示されるまでの End-to-End 遅延として50msを実現しており、これにより視覚と身体感覚との操作のずれをほぼ感じることがなくなり、動きの速い対象物に対して正確な操作や身体的直感に即した操作が可能となっている（図7）¹⁰⁾。

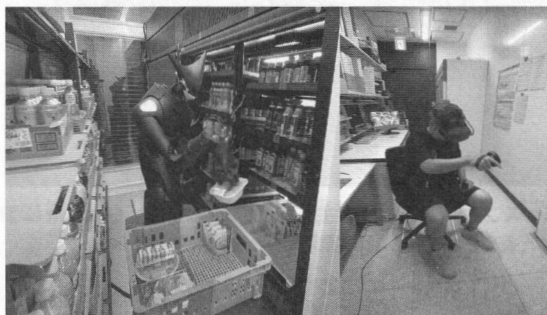


図7 テレグジスタンスアバターロボットによるローソンの実店舗における商品の通常陳列作業

また、遠隔操作中の商品のピッキング、設置などの、オペレータとロボットの動きに関するデータを蓄積し、人工知能（AI）に学習させることで、遠隔操作によらず自動で制御・処理する割合を増やす自動化の研究開発も併せて進めている。なお、本件は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「Connected Industries推進のための協調領域データ共有・AIシステム開発促進事業」の枠組みで行われた。

将来的には、どこからでも店舗スタッフがロボットを通じて就労可能な、全く新しい店舗オペレーションが可能となる。人と人との接触を減らすことにより、新型コロナウイルスの感染拡大防止につながるだけではなく、少子高齢化や就労人口の減少により人手不足に悩む店舗に導入し、高齢者や介護や子育てをしている人、さらには海外からでも就労可能にすることに加え、自動化と組み合わせることで1人が複数店舗を担当できるようにするなど、我が国の就労人口減少という社会課題の解決に貢献することになる。

また、AVATAR XPRIZEの影響を受け、我が国の科学技術政策もAVATARを意識し始めている。内閣府が1,150億円の基金の下、2020年度から開始する「ムーンショット型研究開発制度」の六つの目標の第一目標として、「人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」を掲げ、誰もが多様な社会活動に参画できるサイバネティック・アバター社会とサイバネティック・アバター生活の実現に挑戦する。すなわち、「テレグジスタンス社会の実現」を目指しているのである。

2030年までに、一つのタスクに対して、1人で10体以上のアバターを、アバター1体の場合と同等の速度、精度で操作できる技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築するとともに、望む人は誰でも特定のタスクに対して、身体的能力、認知能力及び知覚能力を強化できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を提案するとしている。そして、2050年までに、複数の人が遠隔操作する多数のアバターとロボットを組み合わせることによって、大規模で複雑なタスクを実行するための技術を開発し、その運用等に必要な基盤を構築するとともに、望む人は誰でも身体的能力、認知能力及び知覚能力をトップレベルまで拡張できる技術を開発し、社会通念を踏まえた新しい生活様式を普及させるとしている。

5. おわりに

世界的にはAVATAR XPRIZEにより、そして、国内的にはムーンショット型研究開発が機動力となり、2030年にかけて、環境、距離、年齢、身体能力など様々な制限に関わらず自在に瞬時に移動することを可能とするテレグジスタンス技術が実用化され、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、人間の立入りが困難な災害現場等でのアバターを活用等を通じて、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り、そのときには本格的なテレグジスタンス社会が実現されるものと予想される（舘予想）^{11,12)}。

人間に新しい身体を義体として与え、時空の瞬間移動をバーチャル（実質的）に可能とするテレグジスタンスは、パンデミックや大規模災害などの危機に対応できる強靱な社会の構築に貢献することはもとより、人間がより人間らしく生きていくこと¹³⁾においても、今後大きく貢献していくことであろう。

参考文献

- 1) S. Tachi : Telexistence 2nd Edition, World Scientific, ISBN 978-981-4618-06-9 (2015)
- 2) 舘 暲, 小森谷清 : 第3世代ロボット, 公益社団法人計測自動制御学会誌 計測と制御, Vol.21, No.12, pp.1140-1146 (1982)
- 3) 舘 暲 : 20年後のテレグジスタンス, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.21, No.3, pp.34-37 (2016)
- 4) 舘 暲 : テレグジスタンスと私, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.1, pp.29-30 (1992)
- 5) A. Scoică: Susumu Tachi -- The Scientist who Invented Telexistence, ACM Crossroads, Vol.22, No.1, pp.61-62 (2015)
- 6) S. Tachi, Y. Inoue and F. Kato : TELESAR VI : Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot VI, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 17, No. 5, p.2050019 (1-33) (2020)
- 7) <https://www.youtube.com/watch?v=3glmo2OftPg>
- 8) https://www.youtube.com/watch?v=jWNm_vAGr3I
- 9) <https://tachilab.org/jp/about/company.html>
- 10) <https://tx-inc.com/ja/top/>
- 11) 舘 暲 : 原点回帰 - バーチャルリアリティとテレ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, pp.6-17 (2012)
- 12) 舘 暲 : テレグジスタンスと時空間瞬間移動産業, 自動車技術, Vol.37, No.12, pp.17-23 (2019)
- 13) https://tachilab.org/book/index_ja.html#point01