



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **104**

スマートテレオートノミー分野の 技術戦略策定に向けて

2021年2月

はじめに	2
1 章 解決すべき社会課題と実現したい将来像	5
1-1 社会課題と将来像の定義	5
1-2 解決・実現のための方法	7
1-3 環境分析	11
2 章 解決・実現手段の候補	18
2-1 解決・実現のための課題	18
2-2 分析から得られた具体的実現手段の候補	20
2-3 技術開発の方向性	25
3 章 おわりに	26

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

はじめに

自動掃除ロボットなどに代表されるような機械による作業の自律化（自動化）技術は単純な繰り返し作業から人を解放し、生活の質（QoL, Quality of Life）や生産性の向上に貢献する。リモート会議（オンライン会議）、リモート授業（オンライン授業）に代表されるリモート化技術は、物理的な移動をせずに会議や授業への参加を可能とするため、多様な形での社会参加・働き方の実現に貢献する。いずれの技術も従前より注目され、実用化されている技術であるが、新型コロナウイルス感染症の影響（以下、「コロナ禍」）を受け、人の密集を避けるための無人決済コンビニやリモート展示会など、リモート化、自律化が大きく進展し、更なる取り組みが期待されている。

他方で現状のリモート化技術や自律化技術の限界も

見えてきた。いわゆるアバターなど作業現場にある機械を遠隔地から操作するリモート化技術の応用では現場にある機械を操作者が一対一で操作する必要があり、作業効率が上がらないという課題がある。また、現状のリモート化技術では、遠方の状況把握にも限界がある。さらに、機械に自動的に作業させるには、動作の教示やプログラミングおよび作業対象を固定する治具の設計など事前の準備が必要となる。定型作業では一旦準備が終われば繰り返し同じ動作を実行するため準備に必要な工数を回収でき、自動機械の活用が進んでいる。一方、多数の異なる作業を行う非定型作業では準備の工数が回収できず、自動機械の活用が進んでいない。

本レポートでは、リモート化、自律化がまだ進んでいない応用分野にこれらの技術を社会実装していくことを目的とし、上記の課題を解決するリモート化技術および自律化技術の開発と応用に関して検討した結果をまとめている。

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

本レポートにおいて対象とする技術および応用分野について以下に概観する。対象とする技術はリモート化技術と自律化技術の二つを基本とする。

第一としてリモート化技術を概観する。図1にリモート化技術の概要と操作の例を示す。操作者がいる側から離れたところに作業を行う現場がある。作業現場にはシス

テムやアバター、ロボットなどが配置される。併せてカメラ、マイクなどの計測手段が設置され、計測手段から得られた現場の情報を、操作者側のディスプレイやスピーカーといった出力手段から出力する。その情報を利用して操作者は入力手段により作業現場にある機器を操作し、現場での作業を実施する。

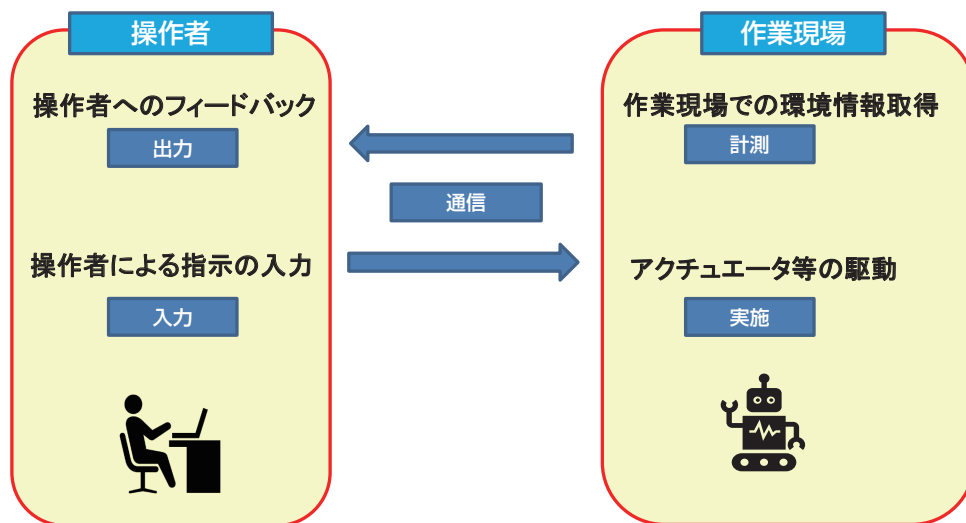


図1 リモート化技術の概要

第二として、自律化技術を概観する。本技術は作業中に人による操作を要することなく、システムやアバター、ロボットなどが自動で作業を遂行するためのものである。作

業現場で環境情報を計測し、自律制御システムが自動的にアクチュエータなどを駆動する(図2)。

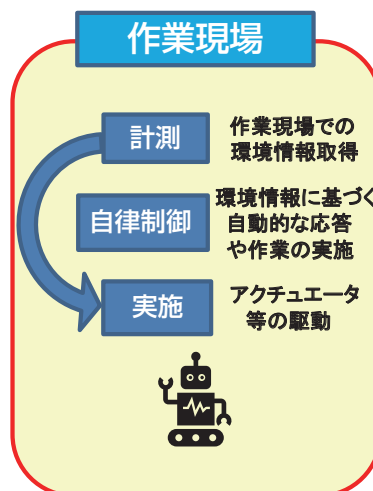


図2 自律化技術の概要

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

リモート化技術、自律化技術を活用する応用分野として、例えば医療・福祉、サービス（接客）や多様な作業を行う製造業などがあげられる。特に診療や接客の例では動作の実行現場に人間がいて、操作者からの遠隔操作での診療や接客、自律的な作業などが実施される。このため直接対応する人や周囲の人への配慮が重要となる。

本レポートでは「スマートテレオートノミー」を新たに提唱する。「スマートテレオートノミー」とは、多様な遠隔操作を可能とするリモート化技術と自律化技術を高度に融合した技術を指す。完全な自律化が難しい作業であっても、できるところから部分的に自律化技術（オートノミー）を適用しつつ、難しい作業にはテレオペレーション（リモート操作）により、操作者が自律動作に介入して作業を効率よく円滑に遂行する。このような自律動作への介入を人工知能（以下「AI」）により適切に遂行する（スマート化）ことにより自律化とリモート化の高度な融合を実現する（図3）。

本技術を実現するための要素技術としては、遠方の様子が詳細に把握できるようにAIを用いて遠方の人の状態を推定する技術、単なる視聴覚情報ではない臨場感をもって操作を可能とするXR（extended reality、仮想現実、拡張現実、複合現実）技術が有効と考えられる。また、人によるテレオペレーションの結果を学習し、自律的に対応できる作業を増やしていく部分自律化技術も想定する。

このように、人の操作と自律的な動作のAIを用いた有機的な融合、すなわち「人×AIとリモート技術の融合」により課題の解決を図る。技術の詳細は2章にまとめる。

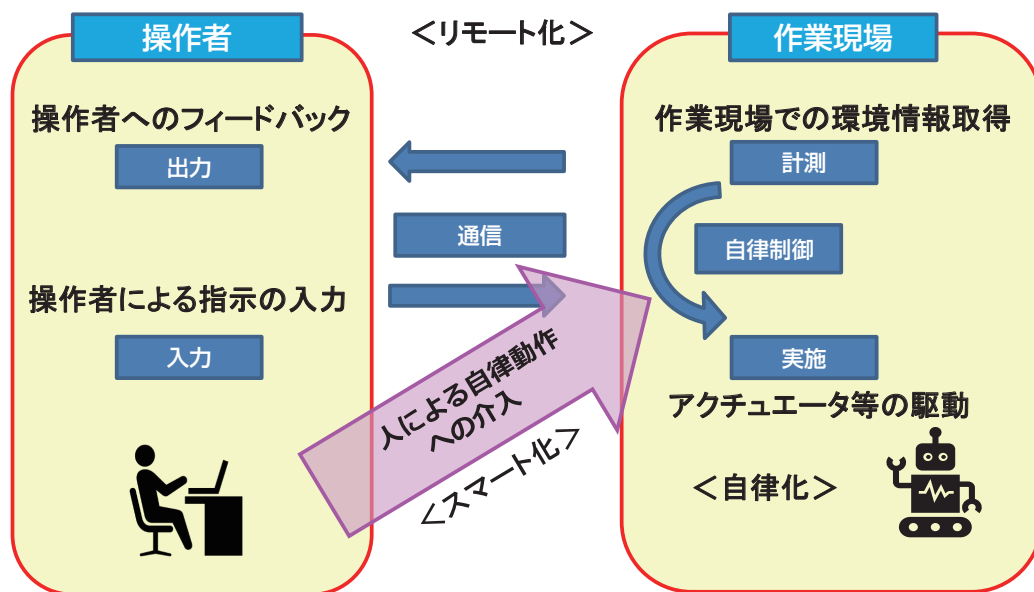


図3 スマートテレオートノミーの概要

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

1-1 社会課題と将来像の定義

日本は課題先進国である。社会生活および産業上、少子高齢化が重要な課題である。総人口が減少する中で、

高齢者人口は3,617万人（2020年推定値）と過去最多であり、日本の高齢者人口の割合は、世界で最高となっている^{※1}。そのため今後、生産年齢人口の減少に伴って労働力不足が懸念される（図4）。

図1-1-2 高齢化の推移と将来推計

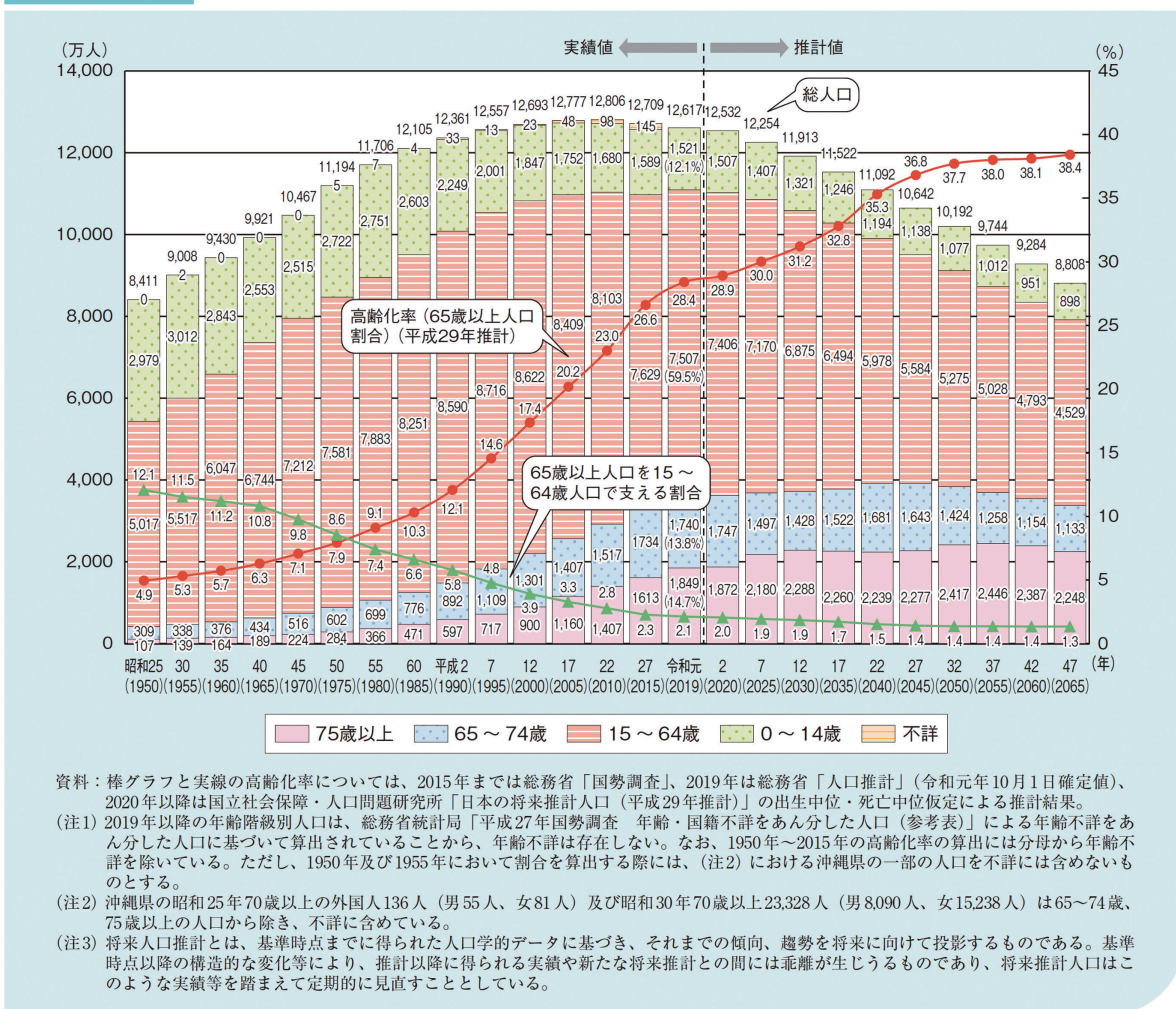


図4 高齢化の推移と将来推計

出所：令和2年版高齢社会白書（内閣府，2020）

※1 平成統計トピックス No.126 統計からみた我が国の高齢者（総務省，2020）

スマートテレポートノミー分野の技術戦略策定に向けて

図5に、2030年時点における産業別にみた人手不足の予測に関する調査結果を示す。全体で数百万人規模の労働力不足となり、特に、サービス、医療・福祉、卸売・小売、製造業で深刻という結果がこの調査では示されている。他方で、介護や育児などにより離職を余儀なくされる人もいるという問題があり、労働力不足の課題に拍車をかけている。

また、コロナ禍による活動自粛、自然災害による交通網の分断など、移動が制限されるような社会状況が生じている。これら感染症や自然災害には医療や防災など直接の対応が必要であるものの、人の移動が制限されるような状況が起こった場合にも経済活動を継続することがレジリエントな社会の実現に重要である。

人の活動の制限に関しては上記の感染症・災害等に

よるほか、高齢化や介護・育児および障がいなどによる制限もある。このような制限下での活動の継続は多様な働き方の実現につながり多くの人の活動の欲求を満たすことになる。ひいては生産年齢人口の減少下での日本の競争力の維持・向上につながるであろう。

これらの課題をふまえ、多くの人の社会活動を維持するとともに人それぞれの多様性を許容し、全員が参画できる働き方を実現することは、結果として関わる人の生活の質(QoL, Quality of Life)の向上に寄与することとなるていく。

以上のように、種々の制限下での活動と多様な働き方を可能とし、労働人口減少にあっても日本の競争力の向上を図り、総合して全ての人のQoLの向上を図ることが本レポートで達成したい将来像である。

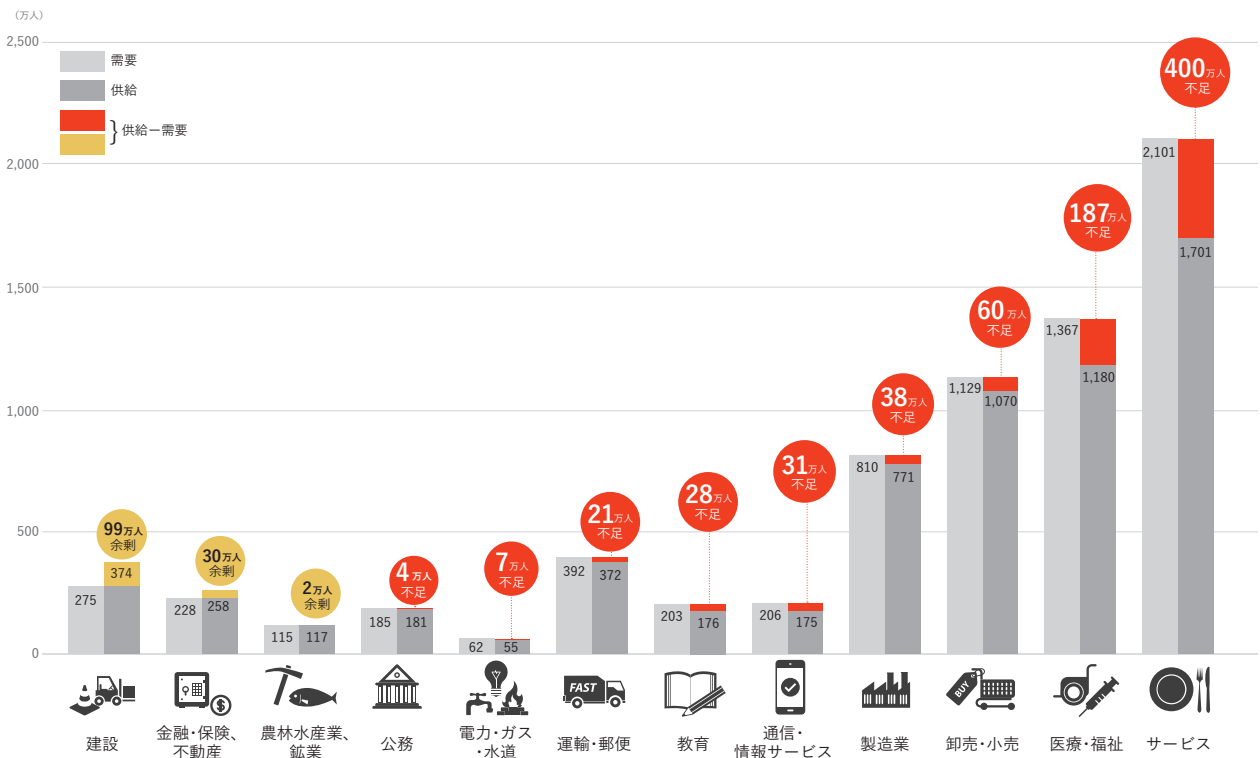


図5 産業別にみた人手不足の規模 (2030年時点)

出所：労働市場の未来推計2030^{※2} (パーソル総合研究所・中央大学, 2018)

※2 <https://rc.persol-group.co.jp/roudou2030/>

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

1-2 解決・実現のための方法

1-2-1 解決・実現方法の検討

社会課題は種々の方策で複合的に対処されるべきものである。少子高齢化の進行のもとで労働力不足を補い、生産性向上によって日本の産業競争力を向上させ、感染

症などによる制限下での経済活動の維持・向上等に資するためには、工学的方法のみならず、健康維持、健康寿命の延伸を実現する医学的方法や社会的方法などが考えられる。それぞれの方法の一例と提供される価値を表1にまとめる。

本レポートでは、このうち工学的方法を検討する。

表1 社会課題の解決方法と提供される価値

解決方法	内容	提供される価値
実現方法①：医学的方法 ・感染症ワクチン、健康維持 ・認知症予防、寿命延伸 等	製薬・バイオテクノロジーなどによる医学的方法	病気の克服や肉体・精神的な健康への寄与から人間の幸福へ、就労可能な人も増える
実現方法②：工学的的方法 ・自律化 ・リモート化 ・生産等のデジタルトランスフォーメーション 等	機械やデジタル技術を用いた工学的的方法	作業効率の向上による日本の競争力向上や人々の活動範囲の拡大
実現方法③：社会的方法 ・移民の受け入れ ・ハンコからの脱却 等	法律等の改定による社会的方法	生産性向上や多様な働き方を可能とする社会の実現

1-2-2 工学的アプローチの検討

1-1にまとめた社会課題を解決する工学的アプローチとして考えられる項目の例と社会課題に対して提供したい価値を表2にまとめる。

表2 工学的アプローチと提供したい価値

工学的アプローチ	提供したい価値			
	制限下の活動	多様な働き方	競争力の向上	QoLの向上
生産等のデジタルトランスフォーメーション			✓	
データ駆動型サービス				✓
リモート化	✓	✓		✓
自律化	✓		✓	
能力拡張技術				✓

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

提供したい価値として、1-1で検討した「制限下の活動」、「多様な働き方」、「競争力の向上」、「QoLの向上」を挙げた。それぞれ以下のような価値を持つことが期待される。

制限下の活動：感染症・災害下で人の移動が妨げられるような状況でも、現場での必要な活動を実施できること。感染症・災害等によるほか、高齢化や介護・育児および障がいなどによる移動・労働活動の制限に対する対処も期待される。

多様な働き方：従来のように現場に毎日通勤する働き方ではない柔軟な働き方を可能とすること。介護や育児などで自宅を離れることが難しい場合、高齢化や障がいなどで活発に行動できない場合でも職を続けられる価値が期待される。

競争力の向上：上記制限下の活動や多様な働き方の実現を通して作業の生産性の向上や労働人口減少に対処し、日本の国際競争力を高める。

QoLの向上：多様な働き方の実現を通じた多くの人の社会活動への欲求の充足や生産性の向上により得られる収入の向上、また、健康サービスやEコマースの拡充による個人の健康や余暇の充実といった価値にも結び付き広い範囲の人の生活の質の向上が期待される。

工学的アプローチとして、「生産等のデジタルトランスフォーメーション」、「データ駆動型サービス」、「リモート化」、「自律化」、「能力拡張技術」^{※3}を挙げた。それぞれ以下のような内容が想定される。

生産等のデジタルトランスフォーメーション：サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合するSociety 5.0に提案されるように、モノの製造・生産においてデジタルとアナログを融合するアプローチ。設計から材料調達管理・製造・出荷まで一貫したデジタル化や生産設備の活用を可能とし、低コストかつ柔軟な生産を実現する。特に欧州でのIndustry 4.0の先行状況に対し、細やかなものづくりや通信接続標準化を活かした製造設備やシステムの国外供給増進など日本の競争力の向上が期待される。

データ駆動型サービス：データを活用したサービスであり、センサ技術で得られるビッグデータとAIを活用した分析によるデータ駆動型のサービスなどが考えられる。データ駆動型サービスによりサービスの質が向上し、医療サービスであれば個人がより適切な医療を受けることができ、QoLの向上につながる。

リモート化：操作者が移動せずとも現場の活動を可能とし、制限下の活動や多様な働き方を可能とする。リモート化技術は働き方のみならず余暇の形も広げ、総合してQoLの向上につながる。

自律化：高い自律化レベルの機械を活用する生産効率化により産業競争力の向上が期待される。また、機械の自律化レベル向上により自動機の利用が簡単となり、種々の活動の制限下においても多くの人の社会活動への参画が可能となる。

能力拡張技術：脚力など人間の能力を直接増強する技術。例えばパワーアシストスーツを装着することで人の動作を補助し、荷物の移動などの作業の負担

※3 コロナ禍後の社会変化と期待されるイノベーション像（NEDO技術戦略研究センター，2020）などを参考に選定

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

を軽減する。パワーアシストスーツ等の能力拡張技術は多くの人の円滑な活動を可能とし、QoLの向上に貢献する。

本レポートでは、提供したい価値を広くカバーするリモート化技術と自律化技術を主眼において検討する。

リモート化技術・自律化技術の進展や高度な融合は、作業者の効率を上げるだけでなく、先端技術に不慣れな操作者であっても直感的な理解と操作が可能となることで業務の質を落とさずに不足する労働力の一部を補うことができる。さらに、身体的障がいや介護などの制約で自宅を離れることが難しい人も、取り残されることなく社会活動に参加することが可能となり、総合してQoLの向上につながると思われる。

1-2-3 リモート化・自律化による 将来像・提供価値の実現イメージ

リモート化・自律化の適用例として、図5に示した中で特に人手不足が深刻と考えられる、製造業、サービス業（卸売・小売）、医療・福祉の各分野で期待される将来像を以下に詳述する。

図6に製造業の例を示す。製造業ではこれまで人が密集して現場で作業にあたっていたが、可能なところに自動機械を配置することで密集を避ける必要がある制限下での活動を可能とし、作業効率の向上を図る。機械は基本的には自律的に作業するが、自律化が難しい作業や障害発生時には人が遠隔操作で対応する。機械の自律レベルを高度化することで、一人の操作者が多数の機械に対応できる。高い作業効率を実現し労働生産性を向上することで日本の競争力の向上を図ることができる。

また、熟練者にしかできない作業は熟練者が地理的に離れた複数の工場の機械を必要に応じて操作することで通常作業は非熟練者が担当し、高度な製品も効率よく生産可能となる。機械の遠隔操作により、身体能力などにより移動が制限される場合にも社会活動を行うことで、多様な働き方が可能にもなる。

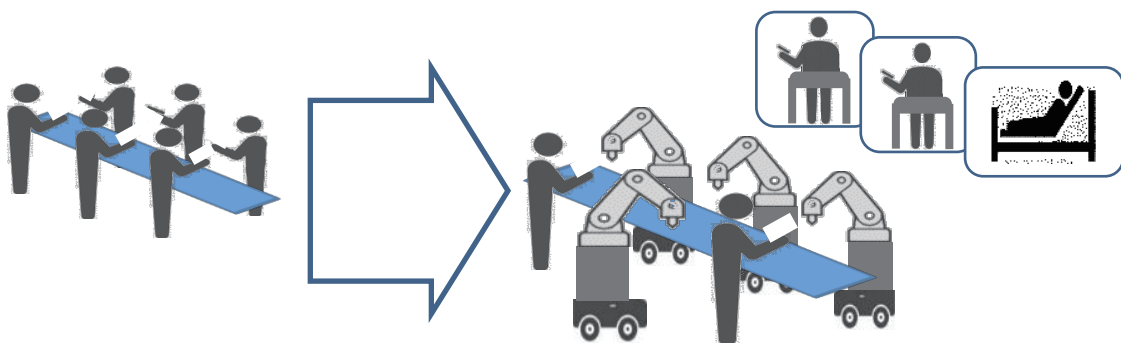


図6 実現したい将来像：製造業の例

スマートテレポートノミー分野の技術戦略策定に向けて

サービス業においては人に代わって機械が売り場で接客したりバックヤードで作業をしたりすることが想定される。定型的な接客や商品の補充を自律的に遂行しつつ、顧客の個別対応は店員がリモートにて対応して、顧客満足度を向上させることができる。顧客が自宅からリ

モート化技術により購入するケースも考えられ、その場合にリモートでも商品をより詳細に確認して購入することができ、Eコマースをより魅力的にし、感染予防に係る移動や車が利用できないなどの制限下での購買活動を可能にする(図7)。

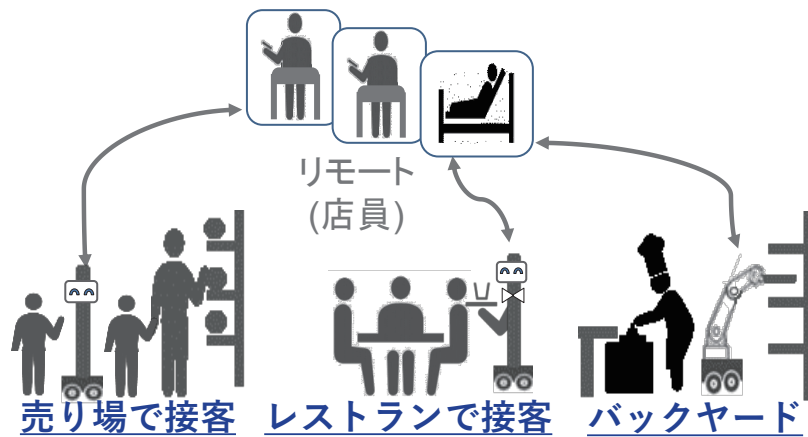


図7 実現したい将来像：サービス業の例

医療・福祉分野では、スマートフォンやPCなどを介して画像を主としてリモートで自宅から専門の医師・介護士など専門家の指示や診断を受ける応用が考えられる。

ゲーム機など民生用機器の進展により、リモート間で交換できる情報の幅が広がれば、自宅にてよりの確な指導・診断を受けることが可能となる。また、地方都市や災害現場など十分な医療施設や多岐に渡る専門分野の医

師が得られないところでは、公共・民間施設での常備設備として映像・音声などの高品位な伝達手段に加えて触力覚や匂いなどの伝達手段を拡充することにより、中央の専門医師の的確な指示・診断が得られるようになる。リモート化技術の高度化により場所・地域の制約が緩和されたサービスが実現され、QoLの向上を図ることができる(図8)。

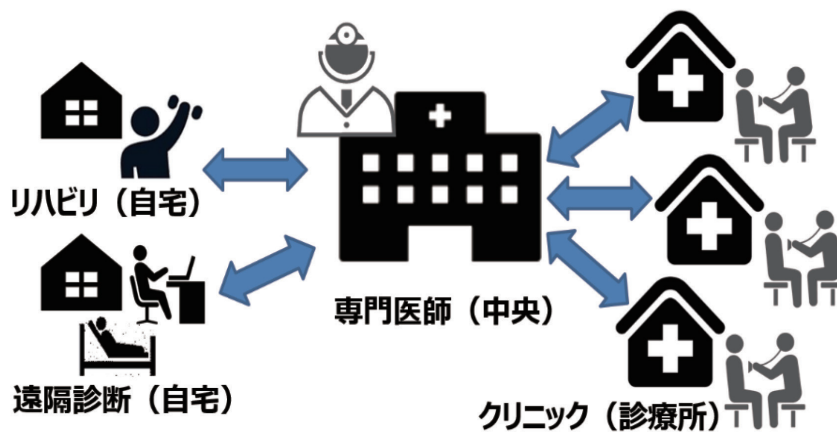


図8 実現したい将来像：医療・福祉の例

1-3 環境分析

1-3-1 各国の政策動向

コロナ禍を受けて、日本の政府計画においては、「骨太方針2020」^{※4}にて、「新たな日常」構築の原動力となるデジタル化への集中投資・実装とその環境整備として、AI、ロボットの導入推進、テレワーク定着、対面主義脱却などが標榜されている。また「統合イノベーション戦略2020」^{※5}においても、産業構造や働き方などのライフスタイルも含めた社会基盤・ルールをデジタル化に対応させ、経済社会活動の可能な限りサイバー空間への移動を実現させる必要性などが述べられている。一方「産業技術ビジョン2020」^{※6}では、人間の認知・身体能力を拡張する人間拡張を支える技術群として、ロボティクス、センシング、XR、ブレイン・マシン・インターフェース、言語の壁を取り払うニューラル機械翻訳等の重要性が高まることと、XRに関連して、テレプレゼンスや遠隔操作による遠隔・非接触化の重要性などが指摘されている。

デジタル化、リモート化、自律化の重要性はどの国も認識しており、各国、一層力を入れていくものと考えられる。例えばリモート化（遠隔操作）技術は1970年代の原子炉建屋での核燃料ハンドリングで実用化されて以来、研究開発と社会実装が進んできた。コロナ禍によりいわゆるアバターやリモート面談など近年の開発成果の現実社会への適用例が増えてきた。特に先端的な実証・実用化が欧米中諸国で急速に進展している。

具体的には人の接触や病院での感染拡大を防止するための遠隔操作を基本としたコミュニケーションロボットによる面談ロボットのDuke大学（米）による発表、紫外線ランプを搭載した殺菌・消毒ロボットのUVDrobots（デンマーク）による開発、消毒液を散布する自律移動ロボットの清華大学（中）の実証、ドローンによる遠隔デリバリーのAria Insights（元CyPhy Works）（米）などの発表が相次いでいる^{※7}。

※4 経済財政運営と改革の基本方針2020（内閣府，2020）

※5 統合イノベーション戦略2020（内閣府，2020）

※6 産業技術ビジョン（経済産業省，2020）

※7 ICRA 2020 Plenary Session（ICRA，2020）

<https://ieeetv.ieee.org/covid-19-how-can-roboticists-help-icra-2020>

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

1-3-2 各国の市場動向

リモート化、自律化技術のうち、表3にリモート化技術（テレプレゼンス）に関する市場規模予測を示す。

市場年平均成長率（CAGR）は、3Dテレプレゼンス市場で約20%、テレプレゼンス装置市場で約5%、テレプ

レゼンスロボットで約18%と試算されている。より高度なりモート化技術の実現に必要なロボットや高い臨場感を実現する技術が占める市場の伸びはより大きく予想されている。なお、ここで示す各市場については、相互に重複する点があることにも注意が必要である。

表3 リモート化技術（テレプレゼンス）に関する市場規模予測

市場	予測(2020)	今後の予測
3Dテレプレゼンス（立体映像に加えて触力覚や遠隔地の環境を再現し、高い臨場感にて双方向のコミュニケーションを実現する技術） ^{※8}	約1,900億円 ^{※9}	2025年に約4,700億円 ^{※10} (CAGR 19.6%)
テレプレゼンス装置（実際の人に現実感を与えるロボットやクラウド等、エンドポイントおよびインフラ技術） ^{※11}	約2,200億円 ^{※12}	2026年に約2,900億円 ^{※13} (CAGR 4.5%)
テレプレゼンスロボット（ディスプレイ、センサ、制御システム等、テレプレゼンス用ロボット実現に必要な技術） ^{※14}	約200億円 ^{※15}	2027年に約700億円 ^{※16} (CAGR 18.2%)

出所：複数の市場規模予測を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2020)

※8 3D Telepresence Market (Mordor Intelligence, 2020)

<https://www.marketinsightsreports.com/reports/01091746464/3d-telepresence-market-growth-trends-and-forecast-2020-2025>

※9 18.5億米ドルを1ドル104円で換算

※10 45億米ドルを1ドル104円で換算

※11 Global Telepresence Equipment Market – Industry Analysis and Forecast (2019-2026) (Maximize Market Research)

<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-telepresence-equipment-market/23573/>

※12 21.1億米ドルを1ドル104円で換算

※13 27.5億米ドルを1ドル104円で換算

※14 Global Telepresence Robots Market Forecast 2020-2028 (Inkwood research, 2020)

<https://www.inkwoodresearch.com/reports/telepresence-robots-market/>

Global Telepresence Robot Market - Industry Analysis and Forecast (2020-2027) (Maximize Market Research)

<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-telepresence-robot-market/27450/>

Telepresence Robot Market (Verified Market Research, 2020)

<https://papernewsnetwork.com/telepresence-robot-market-worth-789-1-million-globally-by-2027-at-20-2-cagr-verified-market-research/>

※15 2億米ドルを1ドル104円で換算

※16 6.6億米ドルを1ドル104円で換算

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

すでに市場が形成されているリモート化技術の応用分野もある。表4にリモート化技術が用いられるデジタル教育、Web会議、遠隔医療の市場予想を示す。

デジタル教育 (CAGR 31.4%)、遠隔医療 (CAGR 17.7%) は、Web会議 (CAGR 8.6%) よりも、今後の高い市場の伸びが予測されている。

表4 リモート化技術の応用分野の市場規模予測

市場	予測 (2020)	今後の予測
デジタル教育 (学習タイプに、自習型・インストラクター主導型含む) ※17	約0.9兆円 ※18	2025年に約3.5兆円 ※19 (CAGR 31.4%)
Web会議 ※20	約1.3兆円 ※21	2025年に約2兆円 ※22 (CAGR 8.6%)
遠隔医療 (tele-ICUなど、医療機関をつなぐものを含む) ※23	約2.7兆円 ※24	2026年に約7.3兆円 ※25 (CAGR 17.7%)

出所：複数の市場規模予測を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

※17 デジタル教育の世界市場 (グローバルインフォメーション, 2020)
<https://www.gii.co.jp/report/mama938892-digital-education-market-by-end-user-individual.html>

※18 84億米ドルを1ドル104円で換算

※19 332億米ドルを1ドル104円で換算

※20 Global Web Conferencing Market Size, Status and Forecast 2020-2025 (Valuates, 2020)
<https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-24L2147/global-web-conferencing>

※21 125.8億米ドルを1ドル104円で換算

※22 190.2億米ドルを1ドル104円で換算

※23 Telehealth Market (Kenneth research, 2020)
<https://www.kennethresearch.com/report-details/telehealth-market/10326726>

※24 264億米ドルを1ドル104円で換算

※25 701.9億米ドルを1ドル104円で換算

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

1-3-3 各国の技術動向まとめ

図9にリモート化技術^{※26}（現場で自律化作業を行う場合を含む）の分野全体の出願人国籍別特許出願件数^{※27}の出願年が2009年から2018年までの推移を示す。

リモート化技術の特許出願が年々増加し、近年加速していることがみてとれる。国籍別に見ると、増加のうちのかなりの比率を中国が占めている。

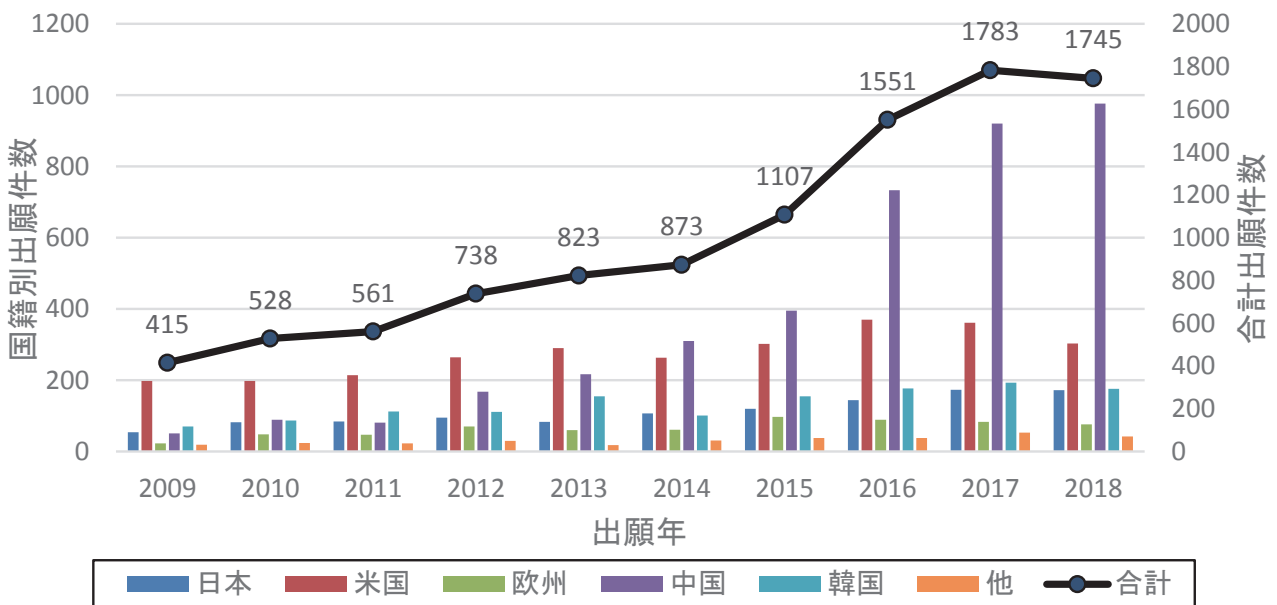


図9 リモート化技術分野の国籍別特許出願件数の推移

出所：Derwent InnovationTMの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2020）

※26 図1に示されるリモート化技術を含み、単にリモコンにより操作される家電などは含まないよう試行錯誤により検索範囲を決定。

※27 ファミリのベーシックレコードを特許出願としてカウント。

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

図10に日米欧韓中の特許庁における出願人の国籍別の出願比率を示す。

欧州へは、米国の出願人が欧州の出願人よりも多く出願しているなど、他国からの出願比率が高い。その他の国では、自国からの出願が多いが、特に中国は最も自国からの出願比率が高い。

リモート化技術の特許出願は年々増加しているが、近年の加速は自国への出願の多い中国籍の出願人によるものである。中国籍の出願人は全体でも近年出願を増やしており*28、この一般のトレンドにこの分野の出願も影響を受けている可能性がある。

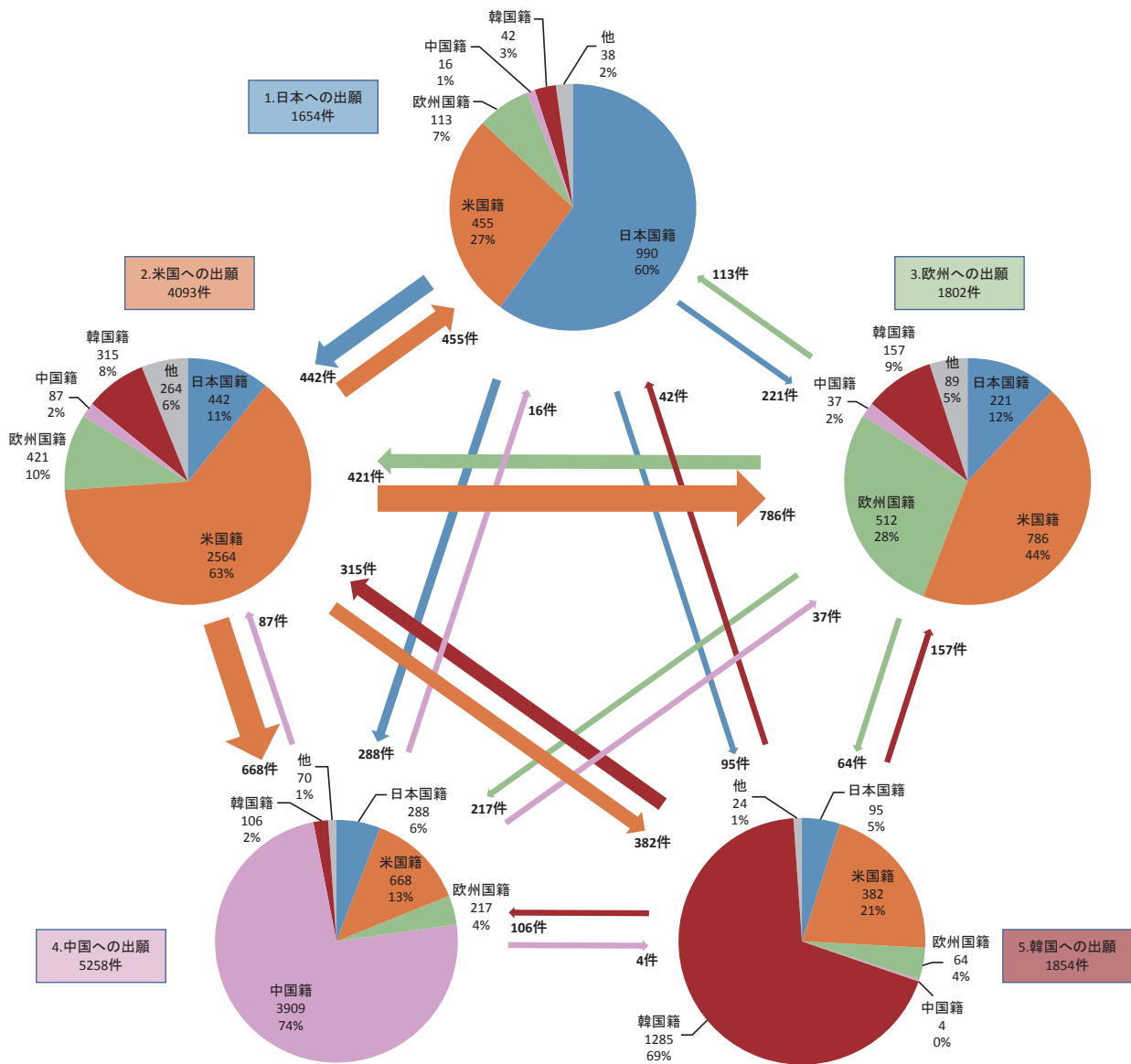


図10 リモート化技術分野の日米欧中韓への国籍別特許出願比率 (2009～2018年)

出所：Derwent Innovation™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2020)

*28 特許庁行政年次報告書2020年版〈本編〉、1-1-20図(特許庁, 2020)

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

自律化、リモート化技術において、用いられる要素技術としては、ハプティクス、AI、XR、ロボット、情報を伝達する通信などが挙げられる。

ハプティクスはリモート化において、現場の感覚を伝えるため操作者に力や振動などを与える技術である。AIは現場で機械が自律的に作業を行うために適用される場面と、リモート化において操作側および現場にいる人の感情や行動の推定に適用される場面とが想定される。XRは、

操作者に現実世界からの情報を元にデジタル情報を重ね合わせて表示することなどに用いられる。

図11にリモート化技術の分野全体を各技術要素に関連するキーワードにより分類した技術要素別の国別の特許件数比率を示す。

全般に中国、米国の比率が高いが、米国がハプティクス、AI、XRの比率が高い。日本は、ロボット、ハプティクスにおいて他の技術要素と比較して比率が高い。

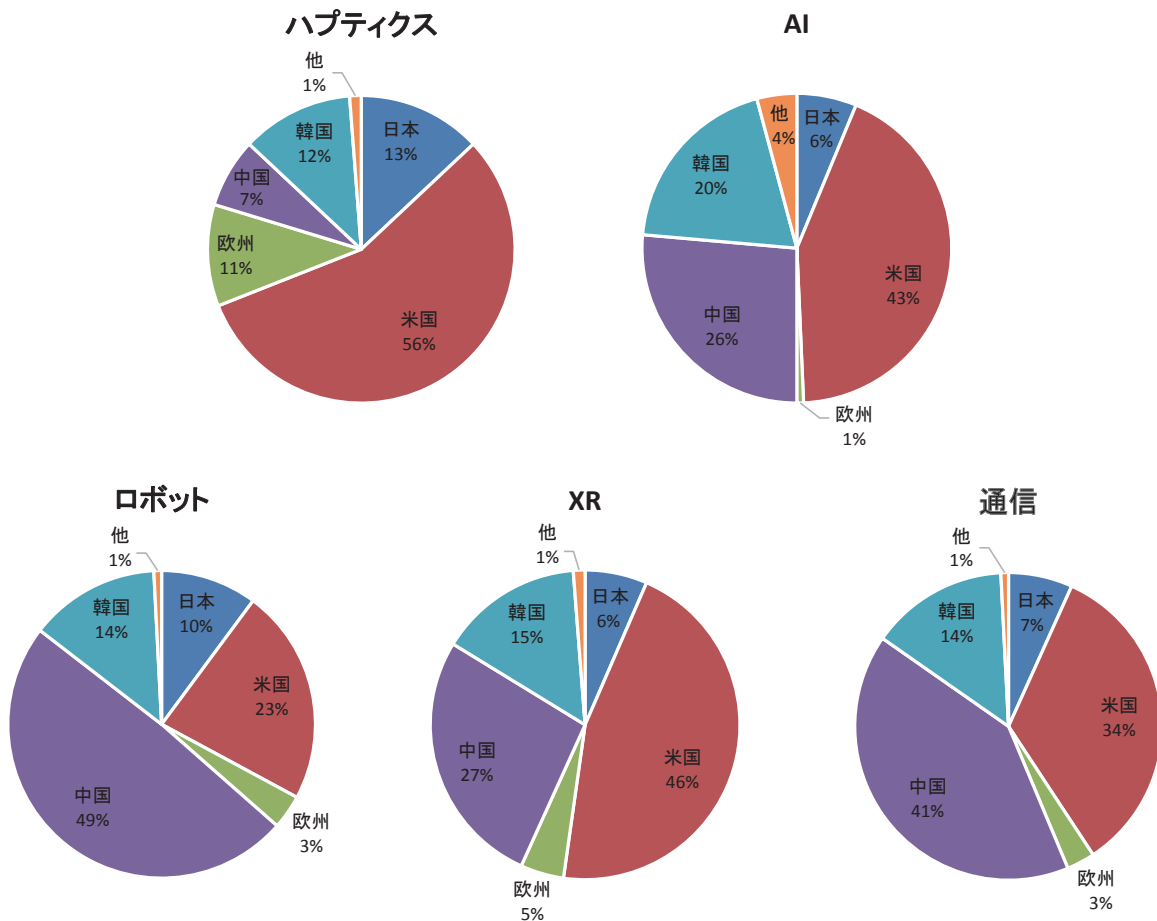


図11 リモート化技術の技術要素別の国別特許出願比率（2009～2018年）

出所：Derwent Innovation™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成（2020）

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

図12にリモート化技術^{※29}に関する論文の国籍別比率、年推移を示す。

論文の報告数も、年々増加している。上位の国籍別件

数では、米国 (16%)、日本 (13%)、中国 (12%) の順であり、総合すると欧州も多い (ドイツ (6%)、イタリア (5%)、イギリス (4%))。

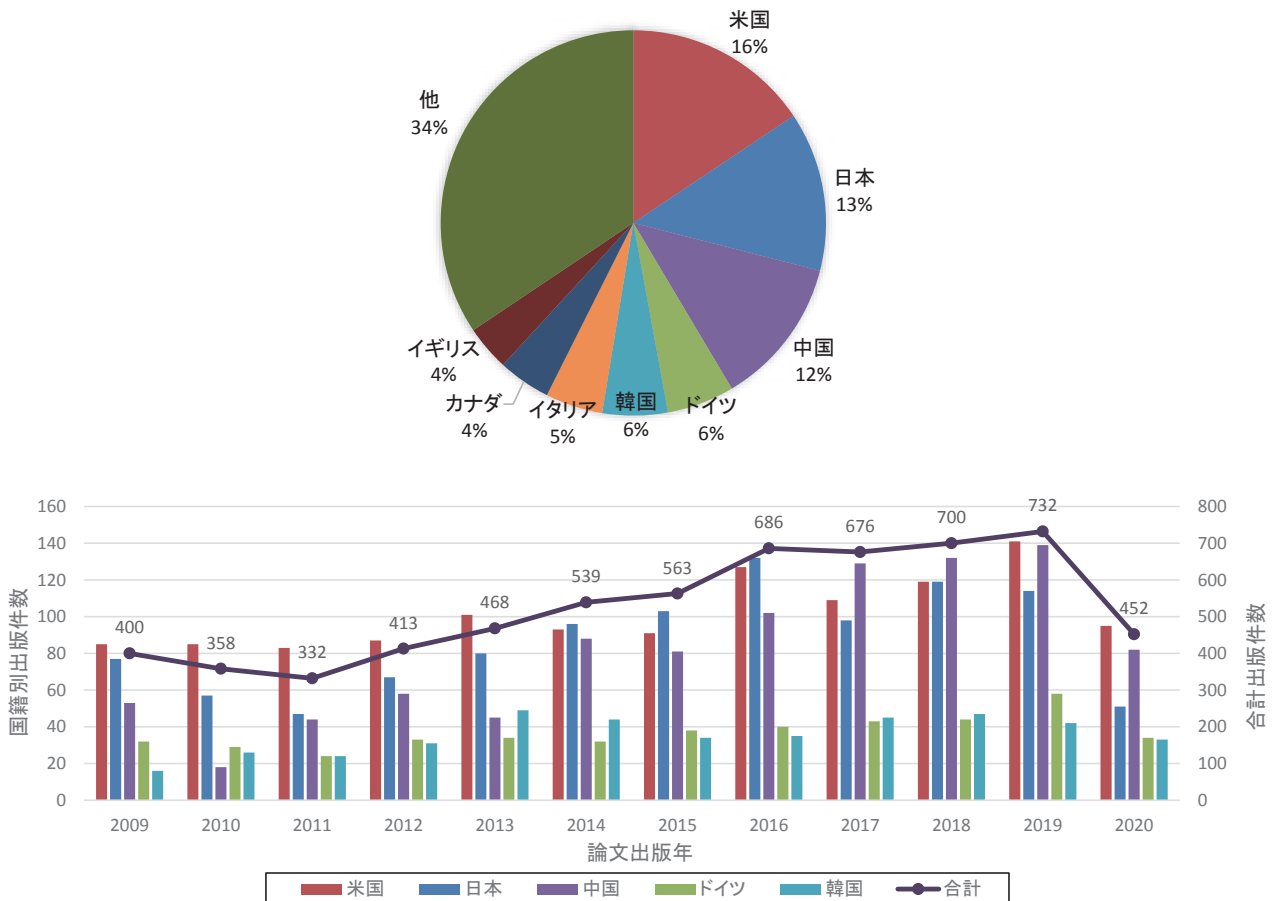


図12 リモート化技術分野の論文動向 (2009～2020年)

上：国籍別比率 下：発行件数の年推移

出所：Web of ScienceTM Core Collection での検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

1-3-4 まとめ

本技術は全体としては、政策上も、各国が強力に推進していく分野であり、市場としても伸びが見込まれる。コロナ禍を受けて、その傾向は一層増すと考えられる。

リモート化技術の特許出願は、近年増加しているが、増加の大部分を中国籍の出願人が占めている。欧州籍

の出願人は、特許の出願比率が低い。技術要素別の特許出願を見ると、米国がハプティクス、AI、XRの比率が高い、日本は、ロボット、ハプティクスにおいて他の技術要素と比較して比率が高い、などの特徴がみられる。

リモート化技術の論文件数では、米国のみならず欧州、日本が中国より多くなっている。

※29 特許調査における検索式を参考に検索範囲を決定。

2章 解決・実現手段の候補

2-1 解決・実現のための課題

1章では日本の社会課題の中で特に人手不足が深刻となる応用分野への対処として期待される将来像を例示し、その実現に効果的と考えられる工学的アプローチの例とそれらが提供したい価値を検討した。その結果、提供したい価値を広くカバーするアプローチとして、リモート化技術と自律化技術に主眼を置いて検討することとした。

両技術は近年来開発が進み社会への実装も進んでいるが、先進的なアイデアは試行段階であり、日本の社会課題への解決手段として大きく役立つにはまだ種々の課題が存在している。以下に両技術の現状と課題をまとめる。

の開発成果の現実社会への適用例が増えている。オンライン会議・授業などは移動を伴わない点に効用が認められ、アバターによる障がい者の遠隔からの接客など就労機会の拡大を狙った試みを実施されている。コロナ禍を受けて、社会の受容性・必要性はさらに高まりオンラインの会議・授業は爆発的に増加した。

画像を主体とするリモート化技術の応用が進む一方、人による機械の直接の遠隔操作による作業の実施は高度な判断や微妙な操作が可能となるため有効ではあるが、製造業やサービス業、医療・福祉分野で広く活用しようとする、以下のような課題が顕在化する(図13)。

- ・ 操作者が作業現場の操作対象に一つ一つに対応する必要があり、作業効率があがらない。
- ・ カメラによる視覚情報とマイクによる聴覚情報のみの伝達では相手の様子(遠隔操作の結果など)の正確な把握が困難である。
- ・ 遠隔操作対象の周りに人がいたり、操作対象の機械が人に接触を含む働きかけをしたりする場合、対象とする人の感情などの状態や周囲の人の動作などの把握や周囲の人に対する安全性の確保が難しい。

2-1-1 リモート化技術の課題

1970年代の原子炉建屋での核燃料ハンドリングで実用化されて以来、リモート化技術は研究開発と社会実装が進んできた。いわゆるアバターやリモート面談など近年

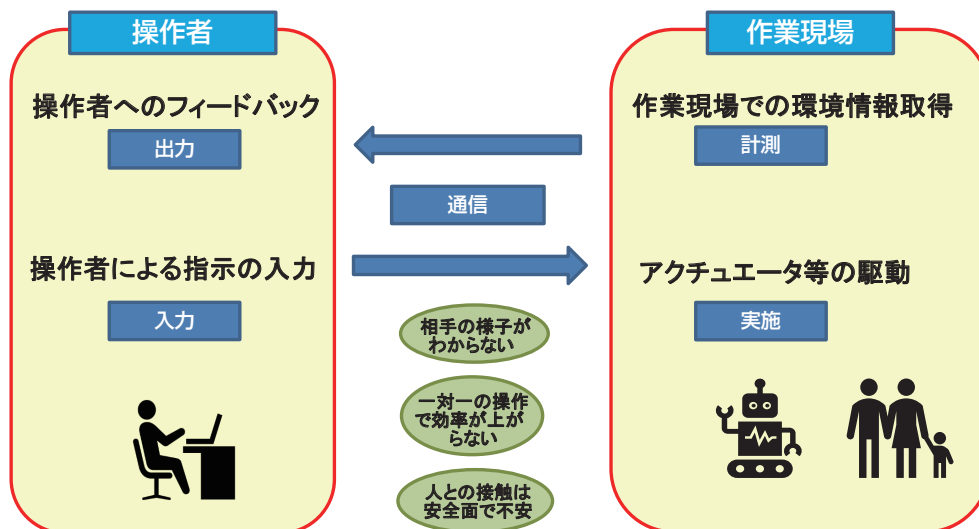


図13 リモート化技術と課題

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

以上の課題は、Eコマースなどでは商品の微妙な風合いがわからない、工場などで作業をしても作業の詳細な結果が簡単に把握できず不安である、といった問題に通ずる。接客や介護など人との身体的・感覚的なインタラクションが求められる場面では、相手の感情が把握できないと適切な対応がとれない、安全面での不安がある、などリモート化技術の適用への制約が生じる。

近年、通信や3次元映像などが進展し、仮想現実などのXRの利用に期待がかかるところであるが、現状ではその利用は限定的である。

2-1-2 自律化技術の課題

自動機械は自動車産業や電子機器産業での大量生産に投入され、日本の製造業を支えてきた。自動機械に作業を実施させるためには、作業毎に何らかの教示と、動作を組み合わせるプログラミングなどの準備が予め必要となる。大量生産に代表される定型の作業において、準備にかかる工数に見合う費用は同じ動作を繰り返し大量に製品を生産することで回収できる。近年需要が増えている少量多品種生産やサービス業への自動機械の適用はこれら準備に要する工数に見合う生産台数が得られ

ず、以下のような課題があり自動機械活用の壁となっている(図14)。

- ・異なる製品の製造工程に対して多数の異なる作業の教示やプログラミングが予め必要となり、それらにかかる費用が回収できない。
- ・人が動作を機械に見せると機械学習システムが動作の見まねにより作業を会得する「模倣学習」など、近年AIを用いた機械学習技術が教示やプログラミングの工数を大幅に削減し、自律化レベルの大幅向上を狙い開発されている。しかしながら、模倣学習の段階と実行段階の別離により作業効率の向上が困難であり、利用の簡単さや確実性はまだ低く、実験実証段階であるという課題がある。
- ・長時間の作業遂行時にはちょっとした作業条件の変化によりまれに発生する障害への対応が必要である。

以上のような課題のため作業のバリエーションがある応用分野への自動機械適用が進んでいない。遠隔操作など人による判断は有効であり、自律化技術との組み合わせによる総合的な作業効率の向上が期待される。

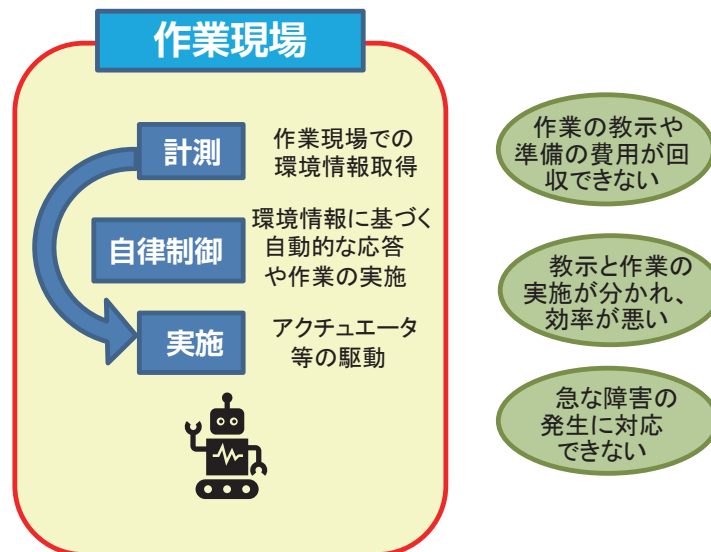


図14 自律化技術と課題

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

2-2 分析から得られた具体的実現手段の候補

上記の課題に対処するため、「スマートテレオートノミー」という概念を課題解決手段および将来像の実現手段の候補として提案する。本技術では、自律化の限界とリモート化における効率向上が困難という両課題に対し、自律化とリモート化技術の高度な融合により総合的な解決を目指す（図15）。

「スマートテレオートノミー」では、完全な自律化が難しい作業であっても、できるところから部分的に自律化技術（オートノミー）を適用しつつ、難しい作業にはテレオペレーション（リモート操作）により操作者が自律動作に介入して作業を効率よく円滑に遂行する。このような自律動作への介入をAIにより適切に遂行する（スマート化）ことにより、多様な形で働き方を可能とするリモート化技術と生産性向上に貢献する自律化との高度な融合を実現する。

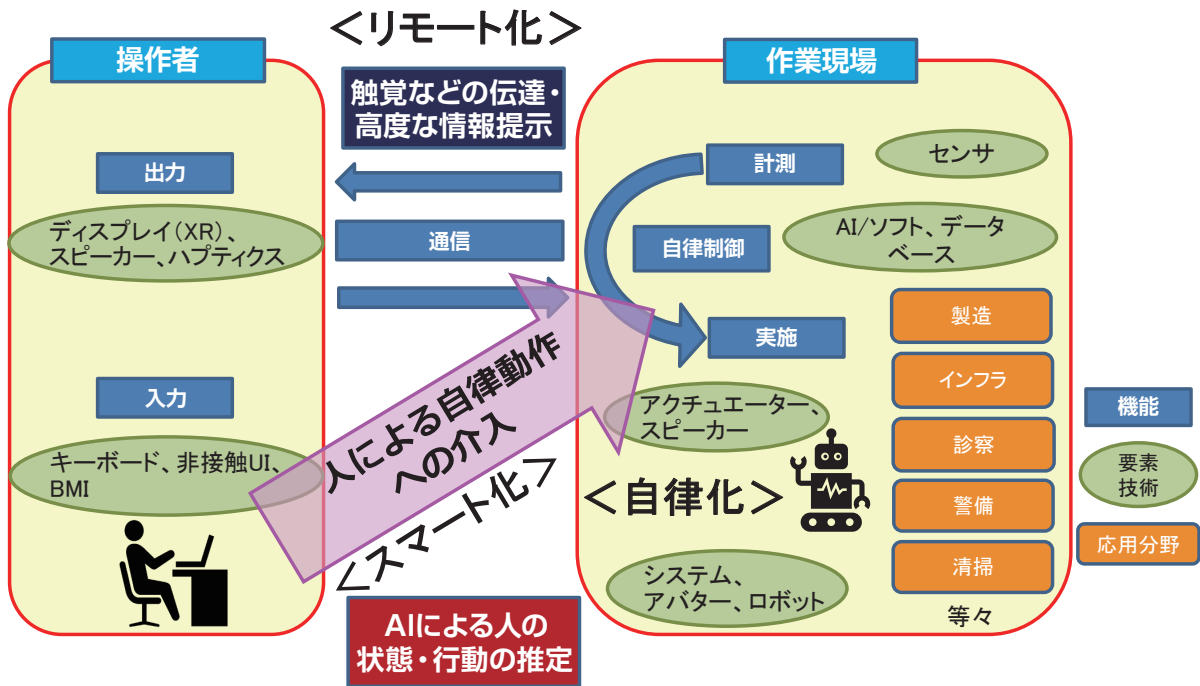


図15 スマートテレオートノミーの概念

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

2-2-1 スマートテレオートノミーを構成する要素技術

スマートテレオートノミーを構成する要素技術として、(1) 遠隔操作に高い臨場感をもたらす高度なXR技術、(2) 遠隔操作時に把握が困難な相手の状況の伝達や周囲の人に対する安全かつ効率よい自律動作を実現するAIによる人の状態・行動推定技術、(3) 自律動作のレベルをAI技術の段階的適用により向上する部分自律化技術、を検討する。

(1) 高度なXR

現状のカメラによる視覚情報とマイクによる聴覚情報だけでは、遠方の様子の把握が困難という課題に対応して、解決手段の一つとして、触覚などの他の感覚の情報の伝達・利用が考えられる(図16)。

Eコマースなどで買いたい商品がどのような物か把握しにくいという課題は、触覚などをあわせて商品の情報を伝えることによって改善される。リモート化技術に触覚、味

覚、嗅覚の情報伝達機能を組み込む。例えば、リハビリ分野への応用では触感や力感を伝えることにより患者の患部の様子がわかり、回復状況の理解が進むといった効果が考えられる。

視聴覚以外の情報について、伝える情報を、必ずしも同じ感覚として再現して伝える必要はない。例えば、患部の固さを遠方に同じ固さとして提示する必要は必ずしもなく、数値で表示してもよい。特に味覚、嗅覚に訴える出力は迅速な切り替えや出力そのものが難しいこともあり、数値・グラフ・色マップなどへ変換しての出力も考えられる。

遠方の状況把握の高度化のためには、視聴覚情報を本来人が持つ能力以上に伝達・提示することが考えられる。例えば、単にその場で見ただけでは死角となり、本来見えない範囲を見えるように提示することが考えられる。本来見えない情報、聞こえない情報を、応用における要請に合わせて、見えるように、聞こえるようにする。生成された情報を正確に理解できるような提示方法の開発も必要である。

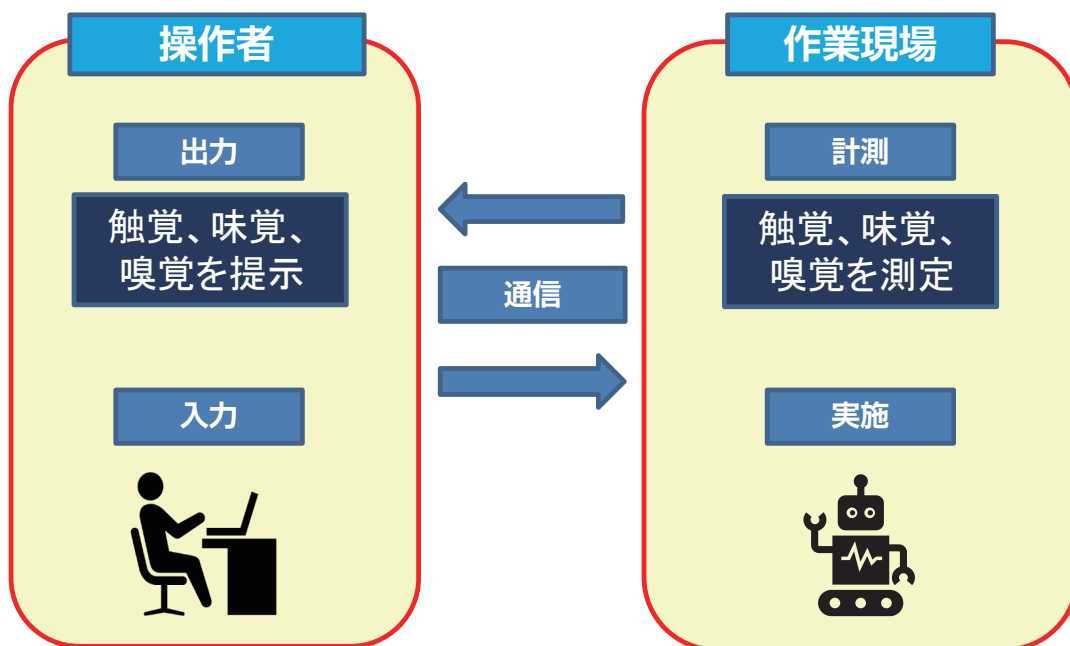


図16 高度なXR技術

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

(2) 人間の状態・行動の推定

人との身体的・感覚的なインタラクションが求められる場面で、相手の様子の把握が困難という課題に対応して、AIを活用して、遠方にいる人間の種々の情報を読み取って、感情などの状態を推定し、コミュニケーションに利用することが考えられる(図17)。

リモートでの介護といった相手の状況を配慮すべき応用分野への適用を考えると、複雑な感情の理解は有用な機能である。感情の理解を正確に行うため、例えば

複数の種類の情報や時系列の情報を組み合わせた推定や、相手の個性に合わせた推定などの技術開発が有効である。

周囲に人がいる環境で自律化作業を実施したり、リモートから機械を操作したりする場合、効率よく作業を実施しながらも周囲の人に安心感を与える必要がある。このためには周囲の人間の行動を推定しその後の動きを予測することで安全な距離を確保したり安心感を与える動きを生成したりすることが可能となる。

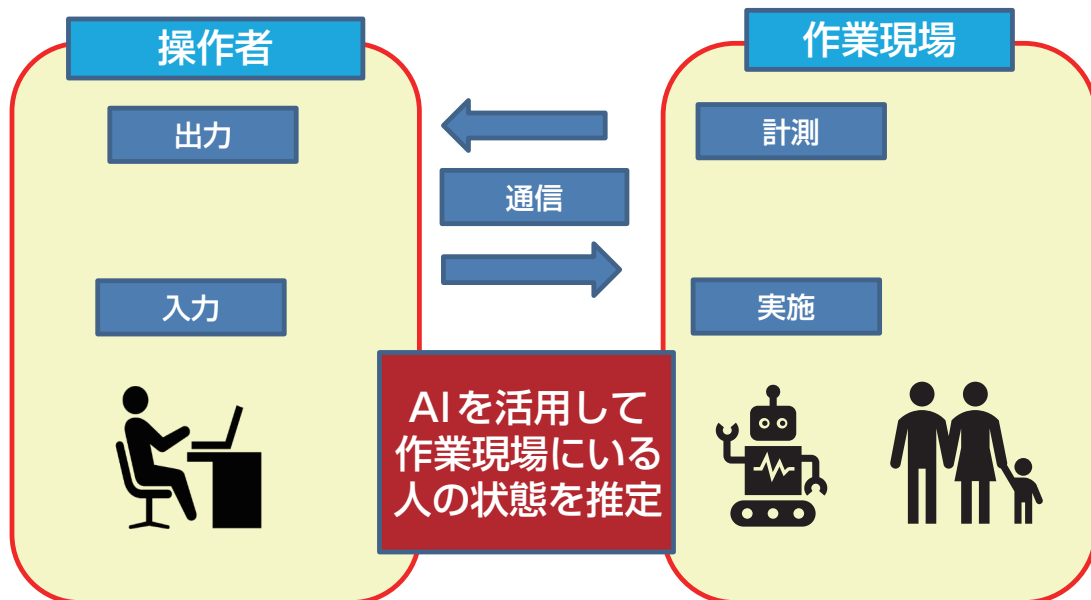


図17 人間の状態・行動推定技術

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

(3) 部分自律化

部分自律化技術は、簡単には自律処理できない非定型作業の多い分野において、AIにより部分的に自律処理を実行しつつ、人間が作業指示を分担し所望の作業を実行する技術である。利用できるAIのレベルにより作業のほとんどを手取り足取り人が操作するいわば逐次操作の段階から、作業目的の概要指示で済む高度自律化の段階まで指示レベルが変化する。利用できるAIの開発が進み自律化レベルが進展するに伴い、指示レベルの抽象化が進展する。図18に技術の概要を示す。

図18の左側に人が行う操作による指示レベルを、「動作」、「行動」、「作業」として記載している。「作業」が上位の概念であり、作業が複数の「行動」の組み合わせによって構成され、行動は複数の「動作」の組み合わせによって構成される。

「作業」指示は、例えば飲食店のバックヤード作業におけるお皿の片づけや配膳、食品製造現場での加工済食材の移送やパッケージ詰めなどに該当する。これを実現する「行動」は皿やトレイや食材などをつかむ・取り上げる・棚にしまう・箱に入れる、などに対応する。それぞれの行動は色々な作業に共通して適用でき、作業ごとに適切な

組み合わせを適切な順番で実行することにより所望の作業を遂行する。行動は「動作」としてのカメラやセンサによる位置の測定、制御装置によるロボットアームの手先位置や姿勢の移動、移動台車の所定位置への移動、などの組み合わせにより実現する。「動作」は対応する機構に内蔵されたモータなどのアクチュエータやセンサの制御により実現するがロボットや台車内部の制御装置で駆動され現状で購入可能な範囲の技術であり、本レポートの対象としない。

自律システムの利用にあたっては作業毎に行動レベルの要素をプログラミングにより組み合わせ、具体的な動作レベルの詳細位置や組み合わせを現物に合わせて“教示”という操作を通して教え込む作業が必要である。ここに経験を積んだ作業者の時間が必要となり大きな費用が掛かるため、自律システム適用上の課題となっている。作業毎に必要な行動や動作の組み合わせを初期段階では人がプログラミングし教示を実施するとしても、人による操作をAIが学習することでその組み合わせをデータベース化し、新たな作業への自律システムの適用時にはAIが適切な行動を自動的に組み合わせ実行できれば大幅な費用削減と作業効率の向上が可能となると期待される。

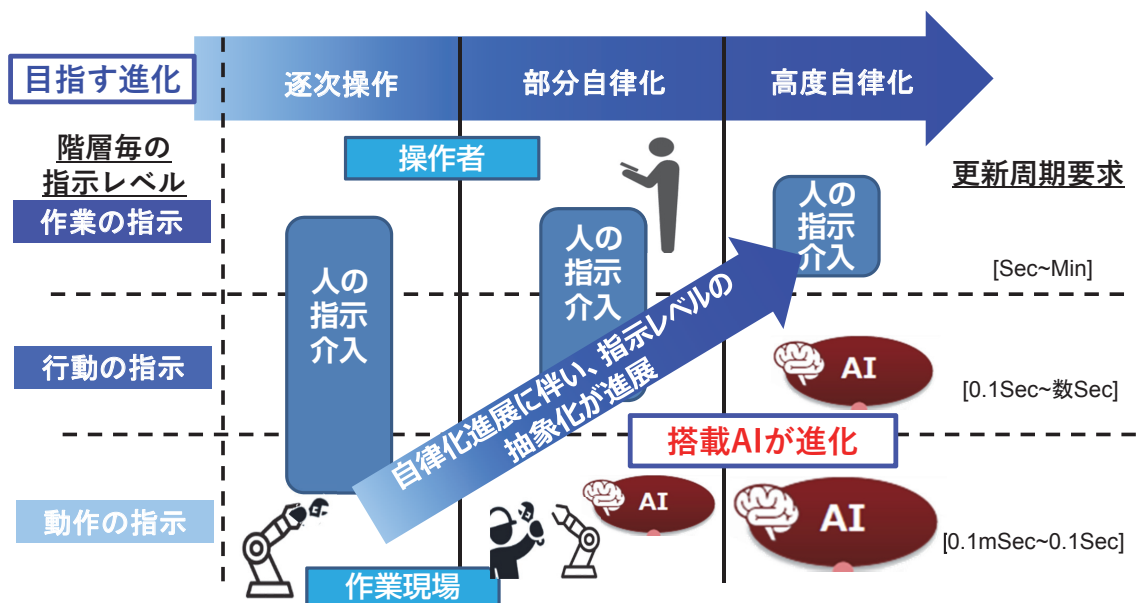


図18 部分自律化技術とその進展

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

2-2-2 スマートテレオートノミー実現のための統合技術

以上まとめたように、(1) 高度なXR、(2) 人間の状態・行動の推定技術は、臨場感を持った操作と安全・安心感の醸成により、リモート化技術の高度化に寄与し、(3) 部分自律化技術は自律化レベルの進化により作業効率の向上と導入費用の削減を可能とする。

それぞれ有効なものの、リモート化技術と自律化技術それぞれに課題があることは2-1項にまとめたとおりである。それぞれの課題を補完し総合して将来像を実現するためには、リモート化と部分自律化を融合する統合技術が必要となる。両技術の有機的な融合の例として、以下のような事例が想定される。

- ・多数の自律システムをAIが見守り、障害発生時には待機している操作者へ現場システムへの操作の介入をAIが依頼。リモートでの人による臨機応変な判断により障害を解決することで、一人の操作者が多数システムを担当して障害発生にも対処することが可能となり、作業効率が向上する。

- ・自律システムの新しい作業への適用初期にはリモートから人が操作し、その手順を自律システムが学習することで遠隔操作の頻度を減らしていく、というリモート・自律統合運用アーキテクチャの実現。人による教示と自律システムの学習が並行して実施され、人の操作から機械による自律動作へのスムーズな移行を可能とする。

- ・介護や接客場面で自律システムが自律的に介助や接客を実施し、必要な時点で遠隔から職員が現場のシステムに介入し、円滑な対応を実現することで顧客満足度を高める。

以上のように、高い臨場感をもって遠方から作業現場のシステムを操作するリモート化技術と高い自律性をもって現場で作業を遂行する部分自律化システムを有機的に統合することにより作業効率や顧客満足度の向上を図ることができる。また、移動や行動に制約がある人や状況においても効率よく業務を遂行することができるため、多様な働き方の実現に貢献し、日本の課題である労働人口の減少に対処することにもなる。

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

2-3 技術開発の方向性

本レポートでは日本が直面する解決すべき社会課題と実現したい将来像を示し、その実現手段としてスマートテレオートノミーを提案した。スマートテレオートノミーを構成する要素技術はリモート化技術としての(1) 高度なXR技術、(2) 人の状態・行動を推定する技術、自律化技術としての(3) 部分自律化技術、であり、さらにリモート化技術と自律化技術を有機的に融合する統合技術が重要であることを述べた。

想定される応用と各技術の将来像をまとめたが、その実現には現在実現している段階とのギャップが存在する。表5に各技術の将来像と現状のギャップを示す。高度なXRについては視聴覚を超えた感覚の伝達と再生技術及び応用の検討が課題となる。人間の状態・行動の推定に関しては推定手法及び活用手法や人の個性への対応などの検討が課題である。部分自律化では新規作業毎に必要な教示の手法やたまに起きる障害への対処に

対する課題がある。各要素技術の利点を有機的に融合する統合技術への取り組みに関しては実証開発例があるものの応用毎に個別に開発が進められ開発効率が悪いという課題がある。

上記課題の解決には以下のような取り組みが有効であると考えられる。

- ・各要素技術および統合技術に関連する産官学の研究開発グループと応用分野のユーザを含む開発スキームを形成する。
- ・開発成果は異なる応用分野で共通に利用できる部分をプラットフォーム化し、AI学習に関わるデータはデータベース化して共通部分を公開、広いユーザによる検証を可能とする。
- ・データベースの形式や利用インターフェースなどの標準化を検討し、開発成果の国内産業界での利用を促進。エンドユーザへのサービスを提供も含めたエコシステムの形成を目指す。

表5 スマートテレオートノミーの将来像と現状のギャップ

	統合技術	要素技術		
		高度なXR	人間の状態・行動の推定	部分自律化
将来像	<ul style="list-style-type: none"> ・リモート化と自律化が高度に融合 ・多様な働き方と生産性向上が共に実現 	<ul style="list-style-type: none"> ・視聴覚,力触覚,味覚,嗅覚の五感情報を活用 ・本来得られる能力を超えた情報の提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・人の感情を推定、リモート応用を円滑化 ・人の行動を推定、安全・安心感を醸成 	<ul style="list-style-type: none"> ・人の概要指示で異なる応用の作業を実施 ・異なる応用に共通な動作を記憶、組合せて高度な作業を遂行
Gap (課題)	<ul style="list-style-type: none"> ・リモート化技術と自律化技術をまとめる基盤が無い ・応用毎の開発試行で開発効率が悪い 	<ul style="list-style-type: none"> ・力触覚、味覚、嗅覚情報の伝達が不十分 ・視聴覚以外のセンシングと再生技術及び応用検討が未発達 	<ul style="list-style-type: none"> ・潜在的な人の行動や感情の推定が困難 ・推定結果の活用、相手の個性への対応、などの検討が未進展 	<ul style="list-style-type: none"> ・新規作業毎に動作の教示が必要で自律化の広い活用は限定的 ・繰返し自律作業時に起きる障害への対処
現状	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操作で学習させ自律動作移行を狙う例や、遠隔見舞い/検診などの実証開始例あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・視聴覚によるXRは商用化事例多数 ・力触覚利用は限定的 ・味覚嗅覚は研究初期 	<ul style="list-style-type: none"> ・生体信号による感情推定や、画像からの人の行動推定や居眠り検出など研究段階 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車/電子機器製造の量産工程に実用化済 ・画像など計測結果の利用は実用化済 ・AI適用は研究段階

3章 おわりに

リモート化技術と自律化技術は、従前より注目されていた技術であるが、コロナ禍による非接触、非密集の要請を経て、一気に利用が加速した。両技術は、オンライン会議やロボットによる案内などのように新たな生活様式の中に取り入れられてきている。コロナ禍はいずれ収まると期待されるが、新しい生活様式は、後戻りすることはないと考えられる。合わせて、深刻な人手不足、誰一人取り残さないという理念の社会への浸透など、リモート化技術や自律化技術を受け入れる状況がそろってきている。

リモート化の観点からは多様な働き方を可能とし、自律化の側面からは生産性を向上し労働力不足を補う、という両者の利点を活かすものとして両技術を高度に融合したスマートテレオートノミーを提唱した。さらにその結果として、質を落とさないサービスや製造を維持し、働く人、サービスを受ける人など、関わる人全ての生活の質（QoL）の向上につながるものとする。

スマートテレオートノミーは、現状の社会情勢の中、様々な課題解決のために不可欠な基盤技術である。一方で、要素技術が多岐にわたるものであり、その社会実装に向けては多様なステークホルダーが連携して取り組むことが重要である。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight vol.104

スマートテレオートノミー分野の技術戦略策定に向けて

2021年2月10日発行

TSC Foresight Vol.104 スマートテレオートノミー分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 岸本 喜久雄

■ センター次長 西村 秀隆

■ デジタルイノベーションユニット

- ・ユニット長 伊藤 智
- ・統括研究員 多田 達也
- ・主任研究員 紋川 亮
- ・研究員 高梨 伸彰

村嶋 清孝

山本 知幸

(2020年12月まで)

有馬 宏和

・フェロー

中屋 雅夫

国立大学法人大阪大学 招聘研究員

林 秀樹

元住友電気工業株式会社 理事、フェロー

山口 佳樹

国立大学法人筑波大学 准教授

遠藤 直樹

東芝デジタルソリューションズ株式会社

平井 成興

元 NEDO 技術戦略研究センター ユニット長

高木 宗谷

元トヨタ自動車株式会社 理事

橋田 浩一

国立大学法人東京大学 教授

■ ナノテクノロジー・材料ユニット

- ・研究員 福田 浩章

- 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

- 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。

