

人に寄り添い、人を高める人間拡張技術 -安全・保守業務の向上と新しい移動価値の創出へ-

国立研究開発法人産業技術総合研究所
人間拡張研究センター 研究センター長
持丸 正明



1. With/After コロナ時代を支える拡張 テレワーク技術

新型コロナウイルスの感染拡大によって、われわれの社会生活は大きな転換を余儀なくされた。そして、この転換が一時的なものではなく比較的長くなりそうだと、また、感染が終息したとしても、社会はウイルス感染前に戻るのではなく新しい社会に移行することになるだろうということが予見されている。感染拡大を低減するには、人と人との物理的な接触を低減することが有効であり、それまで細々と適用されてきたテレワークが急速に普及することとなった。一方で、すべての業務がテレワークに対応できているわけではなく、実態としてはオフィス業務に限られているといっても過言ではない。これは、テレワークを支える人間機能のデジタル化と遠隔化が、視覚（映像）、聴覚（音声）に限られていることに依る。これを、よ

り多様な業種に適用していくためには、対話や所作を伴う接客業務、利用者と空間を共有して行う業務（接客業、エンタテインメント業）や、人に直接触れる業務、複数人での緊密な連携を必要とする業務（介護、保育、建設など）で求められるマルチモーダル（人の複数の感覚モードを活用する）インタフェース技術や、遠隔操作ロボット技術などの研究開発が必要になる（表1）。人間拡張研究センターでは、このような技術を「拡張テレワーク技術」と位置付け、現在、どのような要素技術があり、今後、どのような技術開発とインテグレーションをおこなうべきかの提言を行った¹⁾。

人の能力を時間や空間を越えて発現できるようにするための技術は、後述するように人間拡張技術の一部である。しかるに、人間拡張技術は、With/After コロナ時代の社会生活を支える技術として、重要な位置を占めると言える。

表1 拡張テレワーク技術

	現状	拡張テレワーク	拡張テレワーク2.0
主な業務内容	デスク業務（事務作業、資料作成）、打ち合わせ	対話や所作を伴う接客業務、利用者と空間を共有して行う業務	人に直接触れる業務、複数人での緊密な連携を必要とする業務
特徴	・オフィス外からの社内システムへのアクセス ・音声、動画によるコミュニケーション	・様々な情報源を用いた心・体の状態推定 ・自分の分身を使った業務 ・仮想環境を使った体験の共有	・人やモノに対する高速・高精度な接触、操作 ・現実と変わらないレベルの知覚・認識
主な技術	遠隔会議システム、電子メール、オンラインストレージ、業務管理システム等	マルチモーダルインタフェース、VR、アバター技術	高速・高精度なセンシングや遠隔操作ロボット技術
主な産業	各種産業の自社機能、ソフトウェア・情報サービス業	+ 接客業（飲食・小売・宿泊等）、フィットネス業、教育（特に実技を要する教育）、エンターテインメント業（観劇、音楽、映画等）、観光業	+ 介護、保育、建築、災害救助

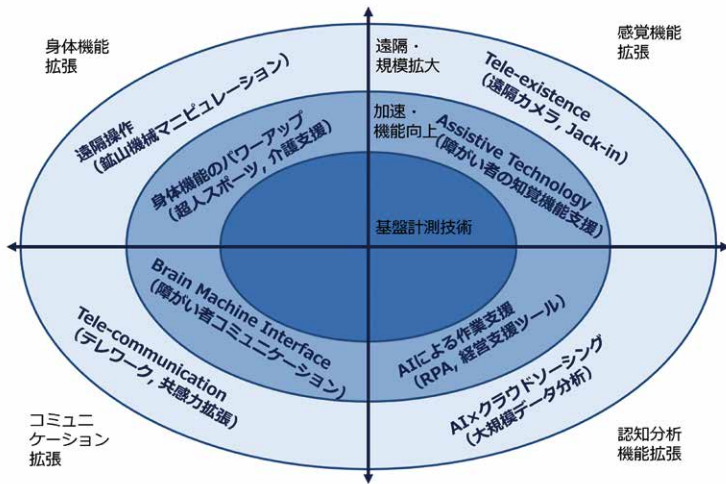


図1 人間拡張技術のマップ

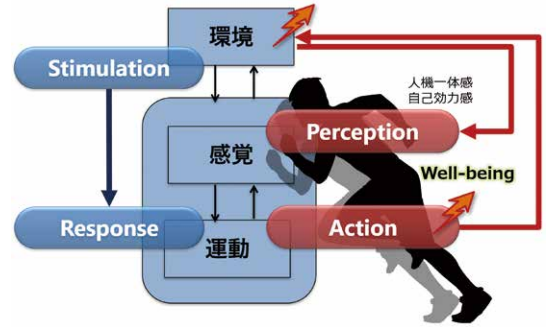


図2 A-Pモデル

2. 人間拡張技術とは

人間拡張とはHuman Augmentationの日本語訳である。Augmentationとは増強することで、音楽であれば半音上げを意味する。Augmented Reality (AR) を拡張現実感と訳したことから、Human Augmentationが人間拡張と訳された。われわれは、情報通信技術やロボット技術を援用したシステムが、人のそばで機能すること（同伴、装着、埋め込み）で人本来の機能をより高度なものにすることを人間拡張と位置づけている。ここでは、拡張すべき人間の機能を身体運動、感覚知覚、認知心理の3つに社会性・コミュニケーションを加えた4つにわけ、それぞれの機能を個別に増強・加速する技術、ネットワークにつながってそれらの機能を遠隔化したり規模拡大する技術に整理した（図1）。例えば、身体機能を遠隔化するものとして遠隔マニピュレーションがあり、感覚機能を遠隔化するものとしてテレグジスタンスがある。損なわれた障害者の知覚機能を増強するものとしてAssistive Technologyがあり、また損なわれたコミュニケーション機能を補う技術としてBrain Machine Interfaceがある。人のスキルやモチベーションを拡張し、時空間を越えて能力を発揮したり、分身を作って同時並行で能力を拡大発揮することを指向する人間拡張技術は、われわれの社会や生活を革新するポテンシャルを秘めている。その要素技術は、図1のようにすでに様々な分野で開発されつつある。人間拡張とはこれらを高度に統合し、イノベーションを生み出す研究領域であるとも言える。

3. 人間拡張研究センターが目指すもの

人間拡張の統合的研究を推進し、社会実装に繋げるための中核として、産総研は、2018年11月に人間拡張研究センターを設立した。研究センターは「人に寄り添い、人を高める技術」の開発を掲げ、人間を後述するA-Pモデルとして捉えて人をよりアクティブにするための技術開発と社会実装を目指している。ここでA-Pモデルとは、「Action-Perceptionモデル」のことである。人間工学などの分野では、図2左のように、「人間は環境から受ける刺激（Stimulation）に反応（Response）するシステム」であると捉えられてきた。これをS-Rモデルと呼ぶ。これに対して、A-Pモデルとは、「人間は常に環境を変えようと環境に働きかけていて（Action）、その結果、どれほど環境が変化したかを知覚して（Perception）、自らの能力を測っているシステム」であるという捉え方である（図2右）。例えば、球技において、ボール（環境）に働きかける行為が増強され、それによってボール（環境）に生じた変化もまた増強されたとすると、人はその結果を知覚して、自分の能力の増強度を認識できる。自分がより上手く環境を変えられたと感じることで、人はまたそれを繰り返し、継続してみたいと考えている。S-Rモデルも、A-Pモデルも、人間のシステム的な捉え方であり、それはコインの裏表のようなものである。ただし、S-Rモデルが「人は環境から受けた刺激に反応する」という受動的なものであるのに対して、A-Pモデルは「人は環境を変えようとし、効果が感じられればその行為を継続する」という能動的なものである。人間拡張研究センターの考える人間拡張研究とは、こ

のA-Pモデルに基づいて、人の行為を誘発し継続させるための技術、すなわち、人をよりアクティブにするための技術の研究開発である。ここでは、人間の能力を増強させるためのシステムが自分と一体になり自分の一部であると思えることが重要となる。これを人機一体感 (sense of agency) と呼ぶ。また、環境変化が自らの行為の結果であると思えることもまた重要であり、これを自己効力感 (self-efficacy) と呼ぶ。センターの掲げる「人に寄り添う」とは、人機一体感を備え、自己効力感を感じられることを意味することになる。そして「高める」ものは、単に身体的な技能やパワーだけでなく、継続したいと思うモチベーションなども含む。われわれは、人々がアクティブになっていくことが「Well-beingなくらし」に繋がるものと考えている。

このようなコンセプトに基づいた研究を統合的に推進するために、人間拡張研究センターには分野横断的に30余名の研究者が集結した。人間拡張技術は、人が表出する情報(体温、皮膚変形、圧力、生理信号など)を人に寄り添ってセンシングする技術、得られたデータをデジタルヒューマンモデルなどで人の状態量(運動、疲労、感情など)に変換する技術、それに応じて人に介入する(ロボット、VR/ARなど)技術からなる。センシングから介入までを、Cyber空間とPhysical空間をまたぎながら迅速に繰り返すことで、人の能力や状態を変化させていく。その研究推進には、ウェアラブルデバイス技術、バイオメカニクス、ロボット、VR/AR、心理学などを専門とするメンバーが必要となる。われわれは、これらの技術で開発された人間拡張システムを製品として販売・提供することだけ

が、社会実装ではないと考えている。むしろ、このシステムを媒体として人間拡張の体験や効能をサービスとして提供し、データと対価を得ることが社会実装の中核的なシナリオであるべきだという考えを持っている。そのため、人間拡張研究センターでは、サービス工学の研究者、ビジネスエコシステムのデザイン研究者を加え、いわば人間拡張の社会実装技術まで統合することで、Cyber-Physicalシステム連携による「Well-beingなくらし」の実現を目指している²⁾。

4. センターの研究事例

人間拡張研究センターで進めている要素技術の研究例をいくつか紹介したい。図4は、ウェアラブルデバイス技術である。人が装着して違和感がない素材に、印刷によってセンサを構成するためのインクの技術が中核となっている。図4上はそのインクを繊維の上に印刷、重合して歪ゲージを構成したものである³⁾。このセンサによって捉えた多点皮膚変形データは、機械学習を用いて身体運動に変換することができる。図3下は、別のインク技術でフィルム上に分布圧力センシングデバイスを印刷したものである⁴⁾。座面の圧力変化から着座している人の状態を推定して介入し会議の活性化を図ったり、靴の中敷きの圧力変化から歩行状態を把握して転倒しないように促したりするなどの人間拡張システムの基盤技術としての活用が進められている。

介入技術として、視覚による情報提示介入だけでなく、力学的な介入についても研究を進めている。図5は「DATSURYOKU」と名付けられた、運動機能の

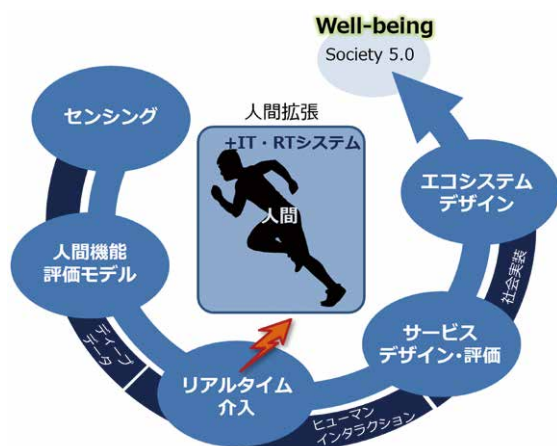
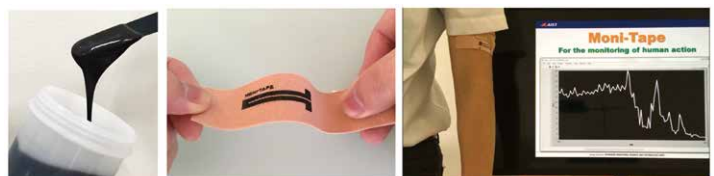


図3 センシングからデザインまで



(a) 繊維素材に印刷可能な歪ゲージセンサ



(b) フィルム素材に印刷可能な分布圧力センサ

図4 ウェアラブルデバイス

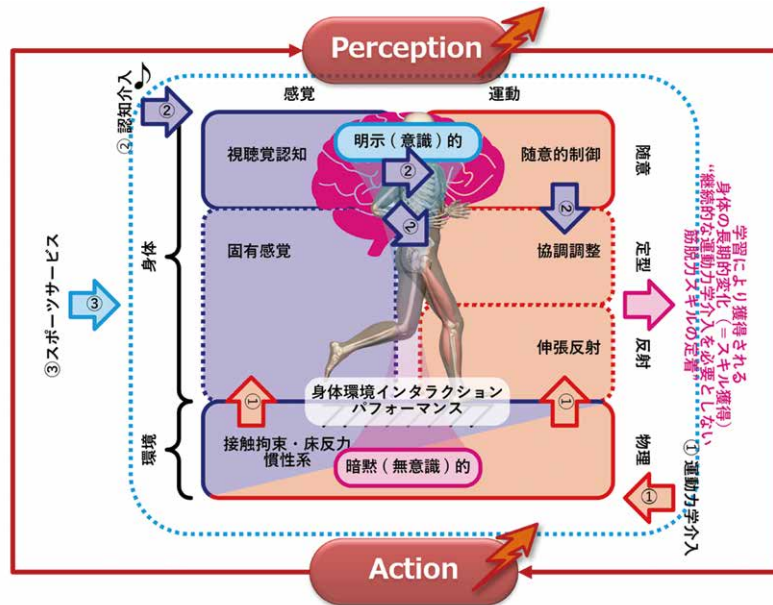


図5 力学・認知的介入による運動機能増強



図6 サービスロボットと従業員の業務可視化

拡張を目指す介入システムの研究である⁵⁾。運動の際に特定の筋を活動させることは、EMS (Electrical Muscle Stimulation) によって比較的容易に実現できる。これに対して、運動の際に特定の筋をリラックスさせることは容易ではない。不要な筋が活動すると関節が硬くなり、パフォーマンスが低下したり、けがの原因になったりする。ここでは、歩行・走行中に左右の床面の速度に差が生じた場合、片方の脚に不随意の筋弛緩が発生する人間の神経筋骨格系の反射の仕組みを活用している。左右独立制御できるトレッドミルによって速度差を発生させる力学的介入を行い、筋弛緩を誘発させる (Action)。ただし、この特殊な力学環境から離脱すると、筋弛緩は発現

しなくなってしまう。そこで研究では、不随意に発生した筋弛緩を、視覚提示などで意識させる認知的介入を組み合わせ (Perception)、機能定着を目指している。

加速度などの慣性センサとマップマッチングに基づく屋内測位技術 (PDR: Pedestrian Dead Reckoning) によって、業務環境での従業員の移動を計測し、環境情報やサービスプロセス情報を統合して作業内容を自動的にタグ付けすることができる。図6は、この技術を和食レストランサービスに適用した例である。この和食レストランでは、厨房から顧客のテーブルの手前までの区間をロボットが膳を移動するシステムが導入された。このサービスロボット導入に伴って、サービ

プロセスを再設計するために、従業員の屋内測位技術が活用された。従業員とロボットの作業ログデータに基づいて、店長と従業員による改善サークル活動が行われ、プロセスの合理化と従業員の再配置が検討、実施された⁶⁾⁻⁸⁾。ロボット導入とプロセス改編前と改編後の業務データの比較から、経営合理化を評価した結果、サービスロボット導入コストは2.2年で償却できる(研究開発経費含まず)ことが分かった。このとき、ロボット代替で従業員業務を一時的に合理化するのではなく、従業員への還元もデザインされた。具体的には顧客接点時間を長く確保できるようにした。従業員には顧客とのインタラクション(対話など)が報酬となり、それが従業員のモチベーション向上に繋がることがアンケート調査で確認されている。

人間拡張研究センターでは、図3の要素技術の連結によって、図5で示したような健康支援サービス、図6のような業務支援サービスのほか、介護支援サービスへの応用の研究を推進している。

5. 安全・保守業務の遠隔化・生産性向上へ

人間拡張技術が、どのようにして鉄道業務に寄与できるのかについて展望してみたい。第一の可能性は、

保守業務への適用である。人間拡張には、図1のように遠隔化や規模拡大という方向性がある。4節で紹介した「人の技能やモチベーションの増強」に「遠隔化」や「規模拡大」を統合することである。具体例をひとつ紹介したい。図7は、VR技術を活用した溶接作業の技能トレーニングの研究である⁹⁾。熟練者と初心者が同一空間にいなくても技能伝達ができるシステムとなっている。このために、多視点の視聴覚情報に加え、触覚情報をデジタル化して伝達するマルチモーダルシステムとなっている。初心者は溶接時の姿勢が適切ではなく、溶接点をしっかり目視できなかったり、手先の制御がうまくできなかったりするが、システムを活用したトレーニングで熟練者に近い姿勢になり、作業効率が66%も向上した。また、溶接作業の無駄が減ったことで、溶接に要する電力エネルギーも88%と大幅に削減できた。このようなシステムは、溶接作業を必要とする現場が全国各地に遍在していたとしても、少人数の熟練者が遠隔からトレーニングできることを意味している。

鉄道業務でも、保守作業は全国各地に遍在しており、その作業工程のすべてがロボット化できるわけではないと理解している。そのような場合、図7のような遠隔スキルトレーニングで、少数の熟練者が、遍在する多数の初心者を遠隔指導したり、さらには、部分的な

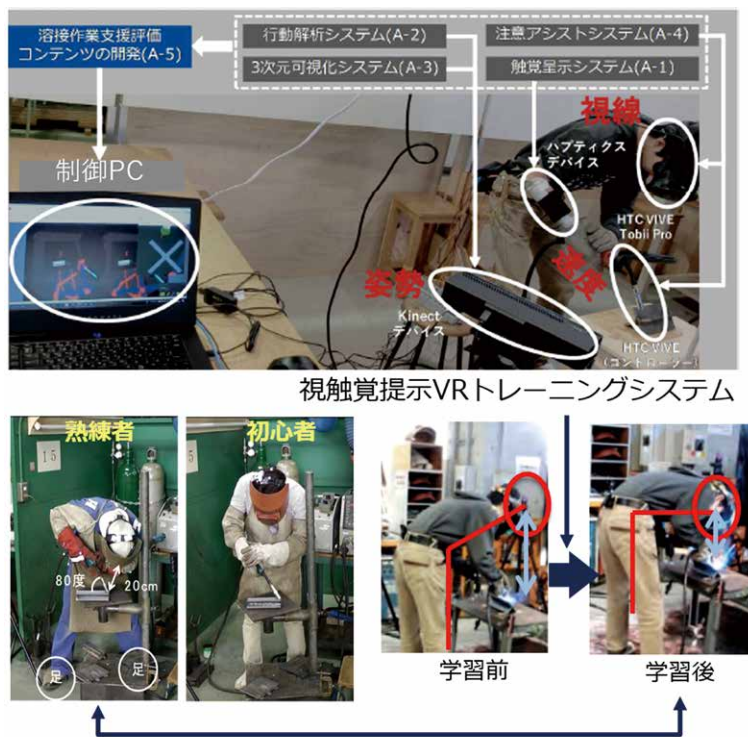


図7 VR技術による溶接作業トレーニング

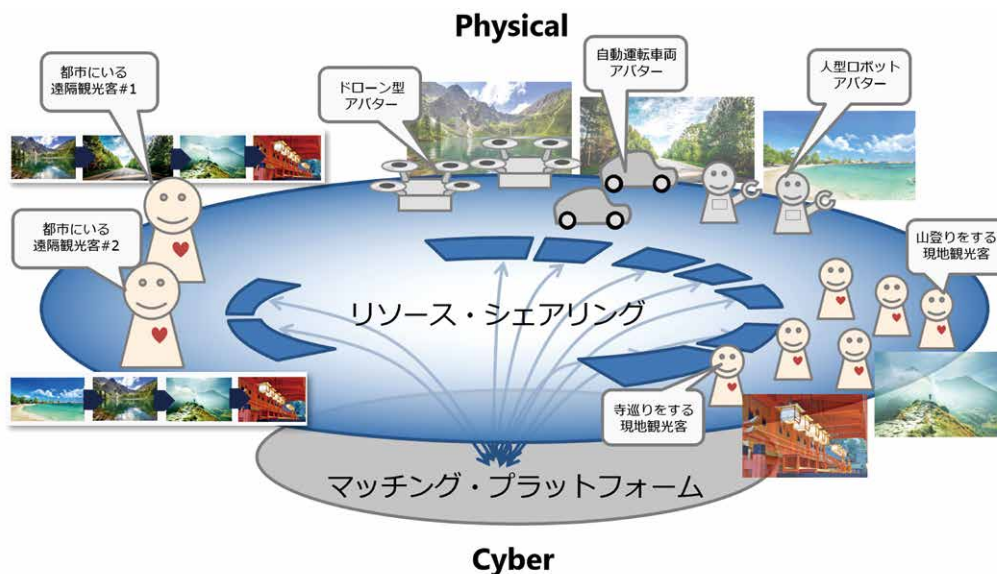


図8 遍在するアバターを活用した新しい観光体験

ロボット導入に応じて図6のように業務プロセスを可視化、再設計することで、業務の合理化、効率化を図っていくことに、人間拡張技術が役立てられるものと期待している。1節で述べた「拡張テレワーク技術」構想に繋がるものである。

6. 新しい移動価値の創出へ

人間拡張技術は、業務だけでなく、人々の生活も革新していく。マルチモーダル感覚伝送や遠隔化の技術は、生活者の移動行動の変革にも繋がる。それはすなわち、業務や生活での物理的移動機会が減少する可能性を示唆している。図8は、人間拡張技術が進展した場合の新しい観光の在り方の構想図である。観光地に、ドローンや自動運転車両などのロボット機械や、人型のロボットが遍在している時代を想定している。ここでは、これらを総合して「アバター」と位置づけている。旅行者は観光地に物理的に移動することなく、これらのアバターに憑依して観光を体験することができる、という構想である。さらに、図8では、観光地にいる観光客も「アバター」として働くことを想定している。これはJack-inと呼ばれる人間拡張技術の延長で、カメラなどを装着した観光客が体験している情報を、遠隔の他人にマルチモーダル感覚伝送する技術である。都会にいる観光客は、このように観光地に遍在するさまざまなアバターを乗り継ぎながら、今までとは異なる観光体験をすることになる。

図8のような構想は、荒唐無稽な夢物語ではないだ

ろう。この実現には、マルチモーダル感覚伝送やアバター間移動のギャップ低減などのインターフェース技術が必要であり、また、多人数が多数台のアバターに次々と乗り移り、乗り換えていくことをスムーズに支える技術も不可欠である。加えて、観光地に遍在するアバターのリソースを、観光需要を持つ遠隔観光客のニーズとマッチングし、シェアリングするネットワーク情報基盤が必要となろう。それらの技術障壁を乗り越えてでも、With/After コロナ時代では、移動や接触を避ける観光がビジネス化されると予想している。それも、デジタル技術で「いままでの観光体験を模倣する」のではなく、人間拡張技術によって「いままでとは異なる観光体験」が提供されるようになると考えている。このような時代を見据え、鉄道事業も、これらの新しい観光体験に対する移動が必要な観光体験の差別化とともに、移動を伴わない観光と移動が必要な観光体験のシナジーを生み出していく必要がある。

7. 柏の葉地区を活用したスマートシティ事業

人間拡張研究センターは、東京大学・柏キャンパス内に竣工した産総研の柏センター内に設置された。つくばエクスプレス線・柏の葉キャンパス駅から徒歩10分あまりである。東京大学や千葉大学との連携を図ることだけでなく、柏の葉という街を活用した研究活動を見据えている。3節で述べた通り、人間拡張研究センターでは、人間拡張技術を備えたシステム

の販売以上に、そのシステムを通じて得られる体験や効果に課金するサービスの社会実装を志向している。Physical空間の人間をセンシングし、Cyber空間で評価して、再びPhysical空間で介入するサイクルを高速に繰り返すCyber-Physicalサービスである。音楽配信や映像配信のように大半がCyber空間で完了できるCyberサービスとは異なる。われわれがフォーカスする健康支援サービス、業務支援サービス、介護支援サービスや、6節で述べた移動・観光サービスが、まさしくCyber-Physicalサービスである。Cyberサービ

スでは、インターネット上で地域にかかわらず顧客を集めて試験サービスを開始できる。一方で、Cyber-Physicalサービスでは、移動手段やロボット、対人サービス従業員などの物理的な資源が不可欠であり、その試験サービスには、物理的資源を集約できる「試験の場」が必要である。

われわれは、研究センターの拠点である柏の葉の街を、このCyber-Physicalサービスの試験場とし、街全体を「Social Lab」として整備していく活動を進めている。図9のように、2019年度から国土交通省のスマー



図9 スマートシティ事業

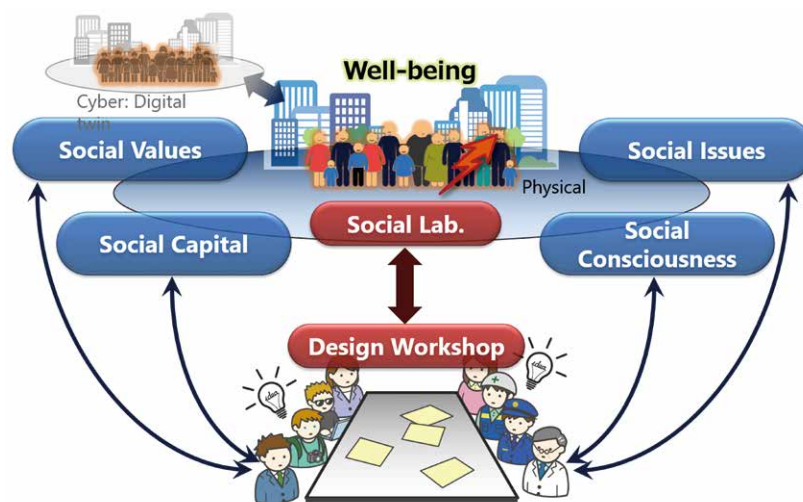


図10 住民参加によるエコシステムデザイン

トシティ事業に採択され、柏の葉地区の主たる地権者である三井不動産、柏市、東京大学、産総研などが連携して、試験サービス運用とそれを通じて蓄積されるデータの活用、それによる社会課題 (social issue) の解決を目指している。ここでは、段階的に街のデジタル化 (digital twin) を進めており、Cyber空間に構成されたデジタルな街 (digital twin) とPhysical空間の現実の街を行き交いながら、サービスの試験実証とデータ蓄積が自由に行える「試験の場」を生み出す計画である。

実際に柏の葉の街を大きな研究機能 (Social Lab) として構築していくには、街づくりに関心を持ち、試験サービスに参加してくれる住民の協力が不可欠である。人間拡張研究センターでは、一般公開などのイベントを通じて地域住民との接触機会を作り、不動産会社、大学、地元企業、自治体に地域住民を加えたデザインワークショップを定期的実施しながら、地域課題・社会課題 (social issue) の共有と解決に向けた仕組み作りを進めている。これらのデザインワークショップの取り組みは、図9のスマートシティ事業と連携し、Cyber空間に構成されたデジタルな街 (digital twin) とPhysical空間の現実の街を活用した人間拡張サービスを通じて、地域課題・社会課題 (social issue) を解決し、住民同士の繋がり価値 (social capital) を高めていく構想である。このような「Social Lab」を活用しながら、次世代の移動価値、生活価値をともに研究できる連携が広がっていくことを期待している。この「試験の場」の活用に関心のある方々は、遠慮なく著者にコンタクトをいただきたい。

参考文献

- 1) 人間拡張研究センター：拡張テレワークとその展望, <https://unit.aist.go.jp/harc/telework.html>
- 2) 持丸正明：研究室紹介－産業技術総合研究所人間拡張研究センター, バイオメカニズム学会誌, Vol.44, No.4, 2020
- 3) S.Kanazawa, H.Ushijima : Development of a Strain Sensor Matrix on Mobilized Flexible Substrate for the Imaging of Wind Pressure Distribution, *Micromachines*, Vol.232, No.11, 2020
- 4) T.Takeshita, M.Yoshida, Y.Takei, A.Ouchi, A.Hinoki, H.Uchida, T.Kobayashi : Relationship between Contact Pressure and Motion Artifacts in ECG Measurement with Electrostatic Flocked Electrodes Fabricated on Textile, *Scientific Reports*, Vol.9, 5897, 2019
- 5) A.Murai : Impedance Model of the Interaction Between Environment and Human Body and Its Modification Design, 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2018
- 6) T.Shinmura, R.Ichikari, T.Okuma, H.Ito, K.Okada, T.Nonaka : Service robot introduction to a restaurant enhances both labor productivity and service quality, *CIRP ICME'19*, 2019
- 7) 南雲彩花, 一刈良介, 新村猛, 中平勝子, 北島宗雄, 大隈隆史 : 和食レストランにおける搬送用ロボットの導入に対する 従業員行動変容の定量化, 第7回サービス学会大会予稿集, 2019
- 8) 大隈隆史, 一刈良介, 新村猛 : 和食レストランにおける人間・知能機械協奏への取り組み, *HCG シンポジウム2018予稿集*, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ, 2018
- 9) 大山潤爾 : 調和的認知インタラクション設計による溶接作業支援システムの開発, *溶接技術*, Vol.66, No.5, 58-65, 2018