

3.9 インタラクション

インタラクション研究分野は、人間と人間を取り巻く環境との相互作用をより快適に設計するための分野である。従来は、情報機器（例えばコンピューターや携帯電話など）とのインターフェース要素技術（狭義のユーザーインターフェースやインタラクションデザイン、対話技法、インプットデバイス）が主に検討されてきた。近年ではそれに加え、われわれをとりまく現実世界と情報世界との相互交流（CPS、IoT）の発展、情報世界に蓄積される大量のデータ（ビッグデータ）とその解析技術の進展を背景に、インタラクション研究に求められるものもより拡大している。

本章では今後さらに重要性が増すと思われる以下の項目について取り上げる。

(a) 人間に密接するインタラクション：

コミュニケーションの手段として、従来の視覚中心のインタラクションに加え触覚（ハプティクス）など他のモダリティを取り込むことが期待されている。情報機器の新たな形態としてウェアラブルコンピューティングは人間の能力を常に増強し、身体状態のモニタリングなどヘルスケア分野への展開も期待されている。BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）は脳機能を補綴（ほてい）するための研究に加えて、健常人の身体行為の増強（オーグメンテーション、エンハンスメント）の基礎的な技術として発展する可能性がある。

(b) 人間の能力を拡張するインタラクション：

上記の BMI、ウェアラブルコンピューティングも密接に関係するが、人間の知的あるいは身体的な能力を補綴・拡張するためのインタラクションを人間拡張工学と総称しとりあげる。電子義足のような身体機能を直接補綴するもの、テレプレゼンスやレイグジスタンスのように人工物と人間の機能を融合して総合的に能力を高めるもの、など多くの可能性が想定される。

(c) 知的な人工物とのインタラクション：

人間の能力の延長としてだけではなく、ロボットのように独立して知的に振る舞う人工物とのインタラクションも重要性が増してくる。HRI（ヒューマンロボットインタラクション）では、ロボットの構成技術のみならず、ロボットと人間が共生するための社会的要因などの研究の展望についても取り上げる。

(d) 情報へのインタラクション・情報を物質化するインタラクション：

情報そのものへのインタラクションも、CPS や IoT の進展にともない重要性がさらに増して行く。コンピューターグラフィックスは現実のグラフィックスによる再現、シミュレーションなどの視覚化、映像表現などを包含し産業的な要請も大きい研究分野であるが、近年ではさらに 3D プリンターのようなファブリケーション技術と **Computer Graphics(CG)**分野で培われて来たシミュレーションやインタラクションが融合し急速に発展している。これは情報を物質化し現実世界へ還元するためのインタラクションととらえることができ、現実世界をセンシングして情報世界に取り込む IoT などの技術を補完するものと考えることがで

きる。

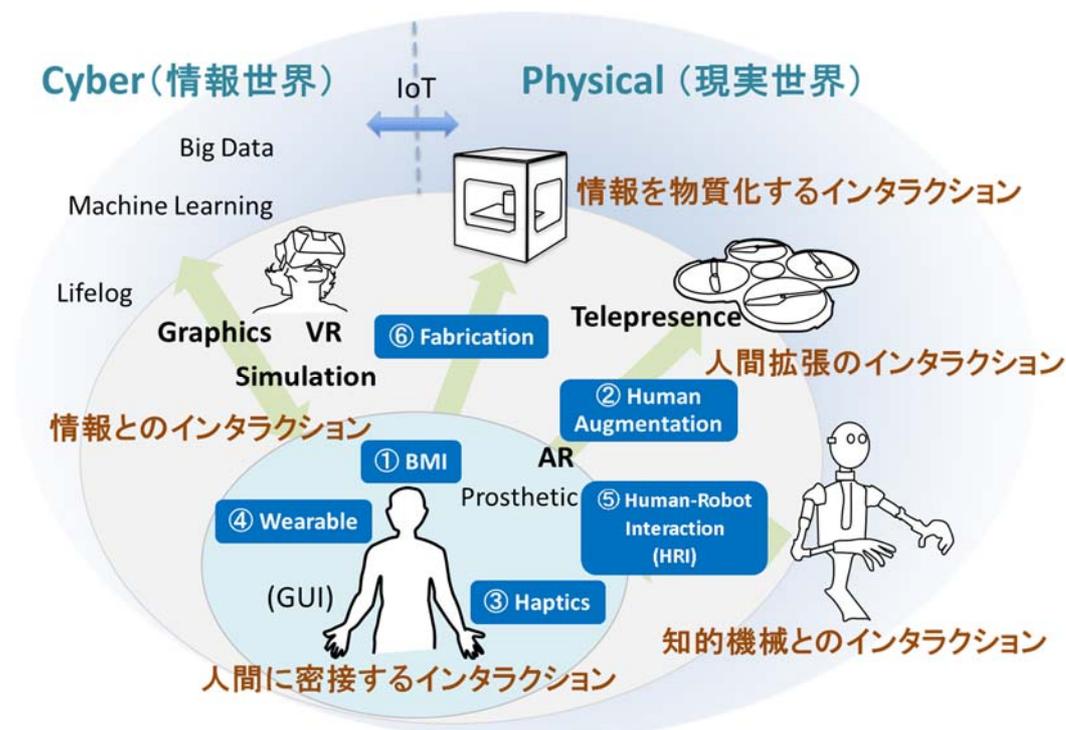


図 3.9.1 インタラクションの俯瞰図

3.9.1 BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）

（1）研究開発領域名

BMI（ブレイン・マシン・インターフェース）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

BMIとは、脳内情報を直接読み取って外部機器の制御信号として用いたり、センサーによって取得された環境情報に基づいて脳の特定部位を刺激したりする、脳と機械の直接的なインターフェース全般を指す用語である。これまでのBMI研究は主に、けがや疾病によって失った脳機能（身体運動、五感、認知機能など）を補綴（ほてい）するために、ロボットアーム、センサー、メモリーを脳に接続し、それらを身体化させる研究が進められてきたが、今後はその発展系として、健全成人に対する身体行為の増強や知的情報活動の支援をする開発が進む（エンハンスメント、オーグメンテーション）。さらには、人間の意識には上らないが脳は検知できる「ミリ秒」「ミリメートル」オーダーでの機械応答を系統的に設計して、潜在的な脳機能の拡張や、異なる脳内処理プロセスの併存と切替を支援する研究が広がる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【BMIの種類と開発目的】

BMIの種類には、大きく三つのものがある。すなわち、感覚機能を機械（センサー）に代行させ、センサー信号を脳神経に送り込む「感覚入力型BMI」、脳の認知機能や情報処理過程に機械が介入し、脳内演算を修飾する「中枢型BMI」、身体運動の企図を機械が読み取り、読み取った信号に基づいてロボットアーム等が動作する「運動出力型BMI」である。BMIの目的には、病気やけがで失った脳神経機能を機械によって補綴する「サイボーグ治療」と、BMIを脳の機能的トレーニング装置として使い、脳の状態をチューニングする「ニューロリハビリテーション治療」の二つがある¹⁾。

感覚入力型BMIのなかで代表的なものに、聴覚障害者のための聴力補綴技術である「人工内耳」がある²⁾。人工内耳は、マイクロホンで取得した音波をマイクロチップ内で電気刺激パルス列に変換し、信号強度に応じて聴覚神経を刺激するもので、医療の世界では人工内耳システムと呼ばれている。人工内耳の研究は、1960年代から1970年代にかけて重点的に実施され、1978年にはヒトへの初の施術がおこなわれた。1980年代からは多チャンネル化が進み、その有効性も明らかになったことから、世界各国で導入が進んでおり、現在国内でも保険適用の下で施術が受けられるようになっている。

感覚器機能の補綴を目指したBMIの第二の例は、視覚障害者のための視力回復技術である³⁾。これは、網膜や1次視覚野に電極を留置し、カメラ映像を二値化、輪郭強調化させたドットパターンに基づいて電気刺激を与え、視力を復元させるもので、人工視覚あるいは人工眼と呼ばれている。1968年に専用の刺激装置を脳内に完全埋植した実験が、ヒトへの初の施術例と考えられている。最近になって臨床に耐えうるシステムが構築されるようになり、欧州では2011年、米国では2013年に販売承認がおりている。

このほかの五感については、いまだ基礎研究の段階か、基礎研究自体がはじまっていない段階にある。触覚や体性感覚については、2010年代からようやく系統だった研究が開始された。これは、後述する運動出力型BMIが一定の成功を収めたことを受け、より精度のよ

いロボットアーム制御を実現するために、感覚フィードバック研究が今後重要になると認識されたことによる。嗅覚や味覚については、その生理学的なメカニズムが十分に解明されていないため、それらに対する機械的介入方法がデザインできないでいる。なお、開発されている感覚入力型 BMI は、いずれのタイプも、「サイborg的治療」を目的としていることに留意されたい。

中枢型 BMI としては、パーキンソン病やジストニアによって生じる不随意運動を治療する目的で、脳の深部にある基底核へ針電極を外科的に埋植し、電気刺激によって異常な神経活動を選択的に阻害する脳深部刺激療法（Deep Brain Stimulation, DBS）が実用化している⁴⁾。1987年にパーキンソン病の治療としておこなわれた DBS が初めての臨床報告だと考えられている。当該疾患に対する第1選択療法はLドパという薬剤の経口投与だが、長期服用にともなう副作用があるため、DBS は第2選択療法として確立している。DBS は、異常な脳内情報処理過程をメカニスティックに遮断する、という発想のため、「サイborg的治療」を目的とした BMI に分類できる。

中枢型 BMI の別の例としては、痛み知覚を鈍麻させる BMI トレーニングがある。これは、機能的磁気共鳴画像装置（MRI）とよばれる、磁気共鳴現象を使って脳の血流応答を計測する技術を用いて、痛みの知覚と調節の座である前帯状皮質の活動をリアルタイム計測して本人に視覚的なフィードバックを与えるものである⁵⁾。被験者は、自身の前帯状皮質の活動量をみて、その大きさを自分の意志で増減するように努力する。継続的にこのシステムを使って訓練することで、被験者は痛みを感じにくい脳状態を自分の意思で作り出すことができるようになる。このほか、頭皮上から計測される電位である脳波をリアルタイムにモニタリングしながら、注意に関する脳活動のセルフコントロールを促進させる訓練法は「ニューロフィードバック」とよばれ、2006年以降、てんかんや薬物依存に加え、パーキンソン病、不眠症、うつ病、パーソナリティ障害、統合失調症、注意欠如多動性障害、自閉症スペクトラム障害など、多種多様な精神神経疾患や発達障害に試みられている。これらは全て、「ニューロリハビリテーション治療」としての BMI に属する。

運動出力型 BMI の研究は、前述の2つのタイプの BMI よりも後発である。これは、基礎研究領域において、運動をつかさどる脳部位の情報表現の理解が不十分であったことに起因する。しかしながら近年では、運動情報の表現様式について機械論的な体系化が一定水準に達したことにより、脳内の運動生成プロセスの一部を機械に代替させる研究開発が進められている⁶⁾。電極を外科的に埋め込むタイプの侵襲性システムに関しては、生体親和性素材の開発、電極の微細化や高密度化技術、脳の皺にフィットする立体成型技術の発展により、脳を傷つけずに電極を親和させ、長期間にわたって安定的に留置できるようになりつつある。これにより、より複雑な身体運動をロボットアームに代替させる運動出力型 BMI が出現している⁷⁾。感覚入力型 BMI の説明で述べたとおり、近年では、ロボットアームの指先で計測した圧力信号に基づいて感覚神経を刺激することで、身体運動と体性感覚のクローズドループを人工構築し、高い身体性と正確なロボットアーム制御を実現する試みが盛んになっている。

運動出力型 BMI の特徴は、脳と機械のコンタクト面である電極を脳内に埋植する上述の

システムだけではなく、非外科的な（非侵襲的な）脳計測を利用した研究も数多く存在する点にある。1980年代ごろになって、脳信号の発生プロセスに関する応用物理的な理解が進み、計測技術や計算機の処理能力が飛躍的に伸展したことによって、EEG（脳波）、MEG（脳磁図）、NIRS（近赤外分光法）、fMRI（機能的磁気共鳴画像法）といった、さまざまなタイプの非侵襲脳活動計測の多チャンネル化（100オーダー）、リアルタイム化（ミリ秒～秒オーダー）が進んだ。これにより、従前に必要だった100～1000回オーダーでの計測信号の加算平均が不要になり、リアルタイムな脳情報のデコーディングが可能となった。非侵襲の脳計測を使ったBMIは外科的作業を必要としないことから、POC（Proof-of-Concept、概念実証試験）とFIM（First-in-Man、臨床試験）が早期に行えるため、ロボットアームやマウスカーソルを動かすようなサイボーグ的BMIだけでなく、脳卒中片麻痺、脊髄損傷、書痙（しょけい）といった運動障害を生じさせる病態脳の異常活動を検出し、その状態を正常化させるために視覚フィードバックや体性感覚フィードバックを与える、ニューロリハビリテーションとしてのBMIが盛んに研究されている¹⁾。

〔産業的な動向〕

EEGやNIRSについては安価、ウェアラブル、実環境計測可能、本人の意思で装脱着が可能、といった利点があり、健常成人をユーザーとしたアプリケーションの開発が盛んである。上述のような医学領域での急速な成功体験を踏まえて、一般向けの運動出力型BMIに関する実用化研究が加速している。両手両足がふさがっていても、念じるだけで機械操作が可能であることから、自動車の電装系スイッチを入れる研究や、念力ゲームコントローラの開発が、大学や民間企業で進められており、後者については米国の少なくとも二つのベンチャー企業（NeuroSky⁸⁾、Emotiv⁹⁾）が精力的に活動しており、製品を市場に供給している。国内では、米国ベンチャー企業が供給する脳波センサーを組み込んだ感性評価システムやエンターテインメントシステムなどが産業展開されている¹⁰⁾。一方で、脳信号が正しく検出されているかどうか十分な検証のないまま産業化しているとの批判や、長期使用によって脳に生じる悪影響も懸念されており、BMIの産業化に際しては、ELSI（Ethical, Legal and Social Issues、倫理的・法的・社会的問題）の迅速かつ実効的な検討が望まれる¹¹⁾。

中枢型BMIの一般応用としては、脳状態をより適切な状態へ誘導する「機能増強（エンハンスメント）」を目指したものがある。睡眠時に記憶定着が起きる際に生じる特徴的な脳波（睡眠紡錘波）をBMIによって検知し、音刺激によってこれを増進させることによって、記憶定着率を高めるものが2000年代以降に相次いで報告されている¹²⁾¹³⁾。現在は、2015年内の販売を目指して、睡眠支援デバイスとしての産業化が進んでいる¹⁴⁾。また、ゴルフのパターのように、的を狙うスポーツ動作の際の脳波を解析すると、ハイスコアになる時にだけ特徴的な脳波パターンが出現することが知られており¹⁵⁾¹⁶⁾、「本人の意識にはのぼっていないが、脳が高い集中状態にある」ということを本人にアラートし、トレーニングを支援する研究が進められている。

〔国内外の動向〕

感覚入力型BMIの一つである人工視覚に関しては、Second Sight社の製品であるArgus 2が欧州でのCEマークを取得し、アメリカ食品医薬局の承認も得たところである。電極の

生体親和性を高めることと、高密度に電極を配置して解像度を高めることが次の技術課題として掲げられており、物性研究と微細加工技術分野との連携研究が進んでいる。日本では、より低侵襲な方式の人工視覚研究が、株式会社ニデック、大阪大学、奈良先端科学技術大学、九州大学らのチームによって進められ、文部科学省橋渡し研究加速ネットワークプログラムなどによって推進されている。

中枢型 BMI の一つである DBS は、腋窩に埋植するバッテリーに対して、経皮的に給電するシステムが実用化するところである。これにより、外科手術による数年ごとのバッテリー取り替えが不要になる。また、長期間にわたって脳を電気刺激することによる副作用を予防することと、症状の日内変動に対応した至適刺激を実現するために、脳活動や筋活動から病状をリアルタイムに同定し、その結果に基づいて刺激強度を調節するクローズドループ型の DBS の検討が進められている¹⁷⁾。DBS を精神疾患治療に応用する試みは欧米を中心に進められているほか¹⁸⁾、fMRI を用いて脳領域間の機能結合性を評価し、これをチューニングし直すことで精神疾患を治療する試みが、ATR、東大、昭和大などのチームによって開始されている（文部科学省脳科学研究戦略推進プログラム¹⁹⁾）。

運動出力型 BMI は、ピッツバーグ大学やブラウン大学による医工連携チームが世界をリードしており^{20), 21)}、ブラウン大学からスピンオフしたベンチャー企業 BrainGate 社の製品がアメリカ食品医薬局の承認を得るところまで臨床研究が進められている。本邦では、欧米における BMI 研究との差別化を図り、これに対抗する目的として、医療応用を見据えた原理実証型研究が文部科学省主導により政策的に推進されている（脳科学研究戦略推進プログラム¹⁹⁾）。これによって、長期に安全な埋め込み ECoG 電極を用いた、サイボーグ治療としての BMI 研究が大阪大学で進展するとともに、脳卒中やジストニアなどによる運動障害に対するニューロリハビリテーション治療としての BMI が慶應義塾大学で大きく成長している。またその果実の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）主導の産学連携プロジェクト²²⁾に移管され、薬事承認の取得をとまなう医療機器の販売までを目指して開発が行われている（未来医療を実現する先端医療機器・システムの研究開発プロジェクト）。本プロジェクトは、2015年4月に発足した日本医療研究開発機構（AMED）に移管されることとなっており、政策的医療機器開発に関しては、これが AMED 発足後初の試金石となる。

米国や日本における医療応用としての BMI 研究とは別に、欧州では非侵襲的脳計測に基づいた BMI をバーチャルリアリティーと組み合わせたり、他の生体センサーと組み合わせたりすることで、高い没入感や身体性をユーザーに提供し、高齢健常人の能力や生活の向上や拡張、障害者の能力改善に応用する試みが盛んである。BrainAble（認知機能のトレーニング法を開発する）、BETTER（高齢者の運動機能の維持向上を目的として BMI を活用する）、ALIAS（BMI を通じて高齢者とロボットのインタラクションをうながして、動作介助やヘルスマonitoringを実現する）、PRESENCIA（BMI をバーチャルリアリティー技術と統合して感覚認知機能を高める）、VERE（BMI を使ってヒューマノイドロボットに自己意識を投影し、テレプレゼンスを構築する）など、複数の欧州多施設プロジェクトが推進されており、当該分野における存在感を強めている。

（4）科学技術的・政策的課題

BMI は今後も、ロボット技術、テレプレゼンス技術、バーチャルリアリティー技術と融合しながら、身体行為の回復や増強が進むと思われる。早期に衰えを検出してそれを復調させる未病対応システムや、すぐに回復が促せなくても BMI が動作をアシストするサポートシステム、あるいはより強力に脳へ働きかけを行って積極的な脳のチューニングを行う治療システムといった、ヘルスケアと医療が連続的なスペクトラムとして提供される。超高齢化にともなう病院対応の限界が言われているなか、疾病予防をしたり、軽度の疾患をヘルスケア側で対応したりできるシステムが構築されることは、我が国の医療健康問題にも大きく資する。

一方、情報系（知能ロボティクス、インタラクション研究）が BMI を使いこなすためには、脳の特徴を熟知し、その情報を読み出す部位や方法、そして情報を読み出すタイミングの「目利き」ができる神経科学者との共同が必要になる。脳は多自由度複雑系であり、その特徴を理解しないままでは、十分に情報技術を活用することができない。

また、「意識に上らなくても、脳は外界情報をセンシングし、それに応じて脳内のプログラムを自動更新する」という、この 10 年で飛躍的に研究が進んだ神経科学上の発見や、その検証手段としての計算論的神経科学の方法²³⁾を取り入れることができれば、これまでの論点にはない新しい知のコンピューティングが実現できる。ロボティクスや計測工学分野においては、脳にこのような特性があることが、まだ十分に知られていない。個人の脳が学習し、新しい能力を脳内に蓄えるプロセスにおいて、ヒトの知覚に上らない「ミリ秒」「ミリメートル」オーダーの世界で機械が介在し、修飾をすることで、「意識しながら物事を学習する」というプロセスにともなう困難を回避することができる。意識的な学習が問題になる例としては、余計なことを考えて学習効率が悪くなる、苦手意識や恐怖が先行して取り組めない（あるいは正しく行為を遂行できず、学習する段階に入れない）、思い込みが邪魔をしてこれ以上は伸びないと思って止めてしまう、といったことが挙げられる。ヒトの状態を常時モニタリングし、その状態に応じて、本人の意識に上らないわずかな負荷を漸次的に提示し続けることで、無意識のうちに能力が熟達したり、このような方法なしには起き得ないほどの脳機能の適応が進んだりすると考えられる。このような取り組みが進むことによって、BMI の応用先は、ヘルスケアや医療にとどまらず、身体芸術、スポーツ、音楽演奏、手工芸といった、高度な身体技能の獲得や伝承プロセスを高効率化させたり、通常では生活や作業が困難な特異環境に対して、苦もなく自然に適応したりすることが可能であると思われる。このようにして、文化文明を支える活動行為の進化をアシストしたり、初学者もプロアマレベルになってともに楽しみあえるような支援ができたりする。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

技術面では、BMI と他の生体情報センサーを組み合わせる試みが一部で拡大してきており、両者の欠点を補い合う実用的なシステムが具現化しつつある。具体的には、建物の壁、天井、床などに組み込まれた環境センサーでユーザーの行動軌跡を分析したり、ユーザーのめがねに組み込んだ視線トラッキングシステムを使って見つめている方向を分析したりして、ユーザーがこれから実行としているアクションの種類をあらかじめ絞り込み、BMI による家電制御や電動車椅子の操作を確実に実行させるといった精度向上方法が研究されている

（総務省 脳の仕組みを生かしたイノベーション創成型研究開発²⁴⁾）。

また、ヘッドフォンやヘッドマウントディスプレイといった、聴覚や視覚に対して高い没入感のあるポータブルデバイスと統合する技術基盤ができ始めており、脳の活動状態に応じて脳へ刺激を与える、人工的なクローズドループを形成することが実現しつつある。これにより、BMI によって脳の持つ能力を書き換えたり、脳の中に異なる複数の入出力関係を並列共存的に生成したりすることができる可能性がある。聴覚や視覚に対する刺激だけでなく、頭皮上から電流刺激を脳に向かって与えることで、脳の特定機能を直接高めるニューロモジュレーション法を、BMI に対して組み込んだ **State-Dependent Cortical Stimulation** も一部で研究が始まっている。ニューロモジュレーション技術に関してはすでに、「脳をオーバークロックする」と称して米国ベンチャー企業がデバイスを発表しており²⁵⁾、今後も産業化が加速する可能性がある。一方、前述のとおり ELSI に課題があることはすでに学术界から警告が寄せられており²⁶⁾、慎重な民生展開が望まれる。

（6）キーワード

機能補綴、サイボーグ、機能回復、エンハンスメント、オーグメンテーション、センサーフュージョン、計算論的神経科学、技能獲得、技能伝承

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	高度埋め込み技術によるロボット操作、多関節複合運動を治療するBMI、精神疾患の脳状態のチューニング（脳プロ（文科省）） 脳を傷つけず、長期に安定的な脳計測を多チャンネルで実現する技術革新が進んでいる。非侵襲型についても、情報統計と次元縮約を駆使して、1000を超える多次元脳データが少ないサンプル数しかなくてもモデルに落とし込む脳情報解読技術が着実に構築されている。脳卒中やジストニアといった神経疾患の脳状態をBMIでチューニングし、従来の医療では治療できなかったタイプの運動障害を克服することに成功している。 また、スマートハウスによる環境センシングデータとの統合により、複数人のユーザーがBMIを使って生活する実証実験が進みつつあり、脳以外の情報で統制をとりつつ、自発脳活動のデコーディングをすることに成功している。
	応用研究・開発	○	→	ロボットスーツHALによる高齢者運動介助、歩行訓練などのなかにBMI機能を搭載し、脳からしか信号が取得できない重度運動障害者のための動作支援やコミュニケーション支援を視野に入れた研究が進んでいる。
	産業化	○	↑	BMIによる脳卒中片麻痺の治療について、パナソニック、日本光電をはじめとした企業グループと慶應義塾大学をはじめとした医療グループが実用化研究を推進している。 電通が米国の脳波センサーを組み込んだおもちゃを発売（ネコミミ）、7万台のセールスを達成している。脳活動をデコーディングできるかどうかの検証が十分でなく、基礎研究サイドとの距離はある。
米国	基礎研究	◎	→	針電極を脳へ埋植することによって高品質な信号を取得し、多自由度なロボット操作がピッツバーグ大学とブラウン大学で実現されている。圧力センサーからの出力に基づいて、脊髄や脳の神経を刺激することで感覚機能を再建し、これによって運動制御の性能を高める研究に歩を進めている。またサルを用いて、脳と脳を人工的に電気接続し、その後の適応過程や能力増強性を調べる研究が、University of Washingtonで体系的に研究されており、理論と実証の両面で研究が発展している。 一方で、研究トピックとしては10年前とほぼ変わらず、コンセプトのリノベーションはやや遅い印象がある。
	応用研究・開発	◎		脳信号が筋肉に伝わってきたところで信号を計測することで、高い即応性と自由度を実現したロボットアーム技術がResearch Institute of Chicagoで開発され、大規模な臨床研究が進められている。日常生活に十分耐えられる時間空間精度を持ち、手首のひねり、肩の挙上、リーチング運動、つまみ動作、握り動作などが実現できる。
	産業化	○	→	BMIによるロボットアーム制御は、ベンチャー企業GrainGateがFDA承認を得るための知見を推進中である。 Neurosky、Emotivといった複数のベンチャー企業が、数万円オーダーの価格で脳波計測モジュールを一般販売しており、複数のゲームメーカーがおもちゃを販売している。 アスリート養成のために、アーチェリー米国オリンピックチームがシューティング時の脳波解析を行い、脳の熟達化支援を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↑	デンマークCopenhagen大学やドイツTubingen大学などで、脳に電流を与えて脳機能を修飾する研究が盛んであり、そのためのデバイス開発が進んでいる。具体的には、リアルタイムに脳内情報を推定する逆問題解法と、脳計測装置の中でノイズの発生なしに脳電流刺激を行えるデバイスが確立している。一部は、日本の研究所や大学に技術移転が進んでいる。

研究開発領域
 インタラクティブ

	応用研究・開発	○	↑	また、BMIを使ってロックトイン症候群の患者のコミュニケーションを実現したり（ドイツTubingen大学）、リハビリテーション応用にも力を入れている（イタリアUniversity of Padova、スペイン、ドイツ）。健常者あるいは要介護者を対象とした生活支援、ヘルスケアを目指した欧州プロジェクトが複数進行中であり、そのなかでバーチャルリアリティーやヒューマノイドロボット研究との融合が進められている。
	産業化	◎	→	基礎研究用のBMIの産業化として、オーストリアのGuger TechnologiesがBMI用の脳波計測デバイスや各種信号処理用ツールボックスを開発、販売しており、BMI研究の標準ツールとして全世界的なシェアを誇っている。その一方で、応用志向の産業化を手がけている目立った企業は存在しない。
中国	基礎研究	△	→	脳波を時系列信号と考えると、その信号構造のなから特徴量を抽出したり、機械学習などによってその状態分類をしたりするような、信号処理研究が盛んである。また、脳波電極表面を微細加工技術によって処理し、皮膚電極間の接触性を高めるような工学的検討も行われている。その一方で、系統だった戦略の下に要素技術を開発している感はなく、個別的な技術改善研究にとどまっている。
	応用研究・開発	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	産業化	×	→	特に特筆すべき事例はない。
韓国	基礎研究	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	応用研究・開発	×	→	特に特筆すべき事例はない。
	産業化	×	→	特に特筆すべき事例はない。

(8) 引用文献

- 1) 牛場潤一. 神経リハビリテーションにおける非侵襲的 brain-machine interface の可能性、神経内科、79 巻、4 号、513～518 ページ、2013 年.
- 2) Mudry A, Mills M. The early history of the cochlear implant: a retrospective. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*, 139(5), 446-453, 2013.
- 3) Lewis PM, Ackland HM, Lowery AJ, Rosenfeld JV. Restoration of vision in blind individuals using bionic devices: A review with a focus on cortical visual prostheses. *Brain Res*, in press.
- 4) Miocinovic S, Somayajula S, Chitnis S, Vitek JL. History, applications, and mechanisms of deep brain stimulation. *JAMA Neurol*, 70(2), 163-171, 2013.
- 5) deCharms RC, Maeda F, Glover GH, Ludlow D, Pauly JM, Soneji D, Gabrieli JDE, Mackey SC. Control over brain activation and pain learned by using real-time functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 102(51), 18626-18631, 2014.
- 6) Green AM, Kalaska JF. Learning to move machines with the mind. *Trends Neurosci*, 34(2), 61-75, 2010.
- 7) Hirata M, Matsushita K, Suzuki T, Yoshida T, Sato F, Morris S, Yanagisawa T, Goto T, Kawato M, Yoshimine T. A fully-implantable wireless system for human brain-machine interfaces using brain surface electrodes: W-HERBS. *IEICE Trans Commun*, E94-B, 2448-2453, 2011.
- 8) NeuroSky, Inc. 125 S Market St – #900, San Jose, CA 95113, United States.

- 9) Emotiv, Inc. 490 Post St. Suite 824, San Francisco, CA 94102, United States.
- 10) 株式会社電通サイエンスジャム、東京都港区赤坂 4-2-28 TRES 赤坂。
- 11) 河野哲也、暴走する脳科学 ~哲学・倫理学からの批判的検討~、光文社新書、2008 年。
- 12) Cousins JN, El-Deredy W, Parkes LM, Hennies N, Lewis PA. Cued memory reactivation during slow-wave sleep promotes explicit knowledge of a motor sequence. *J Neurosci*, 34(48), 15870-15876, 2014.
- 13) Ngo HV, Martinetz T, Born J, Mölle M. Auditory closed-loop stimulation of the sleep slow oscillation enhances memory. *Neuron*, 78(3), 545-553, 2013.
- 14) neuro:on, Intelclinic, 180 Sansome St. San Francisco, CA 94104, United States.
- 15) Kao SC, Huang CJ, Hung TM. Frontal midline theta is a specific indicator of optimal attentional engagement during skilled putting performance. *J Sport Exerc Psychol*, 35(5), 470-478, 2013.
- 16) Babiloni C, Del Percio C, Iacononi M, Infarinato F, Lizio R, Marzano N, Crespi G, Dassù F, Pirritano M, Gallamini M, Eusebi F. Golf putt outcomes are predicted by sensorimotor cerebral EEG rhythms. *J Physiol*, 586(1), 131-139, 2008.
- 17) Carron R, Chaillet A, Filipchuk A, Pasillas-Lépine W, Hammond C. Closing the loop of deep brain stimulation. *Front Syst Neurosci*, 7, 112, 2013.
- 18) 高木 美也子、脳深部刺激法(DBS)をめぐるドイツとフランスの事情、生命倫理、19 巻、1 号、44~51 ページ、2009 年。
- 19) 文部科学省 脳科学研究戦略推進プログラム、<http://brainprogram.mext.go.jp/missionBMI/>
- 20) Homer ML, Nurmikko AV, Donoghue JP, Hochberg LR. Sensors and decoding for intracortical brain computer interfaces. *Annu Rev Biomed Eng*, 15, 383-405, 2013.
- 21) BrainGate Co. Ponte Vedra Beach, FL 32082, United States.
- 22) 未来医療を実現する先端医療機器・システムの開発 プレスリリース文、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ、
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100073.html
- 23) Shadmehr R, Krakauer JW. A computational neuroanatomy for motor control. *Exp Brain Res*, 185(3), 359-81, 2008.
- 24) 総務省 脳の仕組みを生かしたイノベーション創成型研究開発、
http://www.soumu.go.jp/main_content/000161790.pdf
- 25) Transcranial Ltd. Unit 22A, 10-12 Marshgate Lane, London, E15 2NH, UK.
- 26) Fox D, Neuroscience: Brain buzz, *Nature*, 472, 156-159, 2011

3.9.2 人間拡張工学

（1）研究開発領域名

人間拡張工学

（2）研究開発領域の簡潔な説明

人間が生得的に有する感覚機能、運動機能、知的処理機能を物理的、情動的に補償・拡張することを目指す研究開発領域。人がやりたくない作業を代替する自動化技術に対し、自らやりたいことを身体能力に関わらず自由自在に行うための技術を確立することを目標としている。機器や情報システムを自らの手足のように自然に利用する「人機一体」を実現するため、身体像獲得の機序の解明、生体インターフェースの開発、感覚刺激技術などの研究開発課題がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

産業革命以降の機械技術の発達により、人は苦役から開放された。極度の肉体的疲労や健康を損なう危険な環境など、本来望ましくない作業は自動機器により代替されつつある。

今後は機器による完全な代替が困難である作業や、人が自らの望む行動を自由自在に行えるよう支援するような技術開発も、従来行われている自動化技術開発と並行して行う必要があり、そのために必要となる技術体系を人間拡張工学と位置づけることができる。

少子化、高齢化の進む我が国において、人間拡張工学が普及することにより身体的能力を補綴（ほてい）し強化することで、高齢者の持続的な社会参画を可能となる。

人間拡張工学は、メカトロニクス、ロボット工学、センサー工学、ディスプレイ技術、人間工学、ウェアラブル技術、インタラクション技術を有機的に統合した技術領域であり、我が国が得意とするハードウェアとソフトウェアの融合技術に分類され、分野横断的な研究開発により、日本の産業の活性化・競争力強化につながることも期待される。

〔これまでの取組み〕

米国科学研究開発局長官として第2次世界大戦に関わる科学技術開発を指揮したVannevar Bushは、終戦目前の1945年7月、Atlantic誌に”As We May Think”と題した論文を發表し、その中で超小型のカメラをメガネや頭部に取り付け、主観視点映像を記録し共有することや、神経を介して五感を記録・制御するといったアイデアを提案している。その後Ivan Sutherlandが1968年に世界初の頭部搭載型ディスプレイ（HMD）を開発したが、それは巨大で実験室内でしか用いることのできないシステムであった。

Douglas Engelbartは1962年に”Augmented Human Intellect”（人間の知性の拡張）と題した論文を發表した。コンピューターにより人間の知性を拡張することを目的としており、1968年にサンフランシスコで自ら発明したマウスを使った一大デモンストレーションをした。ビデオ会議やワードプロセッサなど、集合知により諸問題を解決できると説いた。

1990年代に当時マサチューセッツ工科大学（MIT）メディアラボの学生であったSteven MannやThad Starnerらによって、小型・軽量のカメラやHMDを用いたシステムが登場し、ウェアラブル技術として人間の知的能力の拡張の研究開発は根付きつつある。

一方人間の肉体能力を拡張するための研究として、ハンディキャップを持つ人の身体能力を補綴することを目的としたアプローチと、健常者の肉体能力を拡張することを目指したアプローチに大別される。前者は補綴工学と呼ばれ、セルビアの科学者 Rajko Tomović により 1963 年に開発された人工義手”The Tomović Hand / Belgrade Hand”を嚆矢（こうし）として世界各国で研究が進められており、近年では MIT Media Lab の Hugh Herr、Ken Endo らがロボット義足を開発している。後者としては、1959 年に Robert A. Heinlein の SF「宇宙の戦士」に外骨格型ロボットスーツが登場し、1965 年に米軍および GE により”Hardiman”として研究が行われた。近年では筑波大学/Cyberdyne 山海嘉之らによるロボットスーツ”HAL”³⁾、Raytheon/SARCOS による”XOS”、Lockheed Martin による”FORTIS Exoskeleton”、Honda による”体重支持型歩行アシスト”、北海道大学 田中孝之による”軽労化スーツ”など、日米を中心として実用化に向けた研究開発が進められている。なお、電気通信大学 野嶋琢也らによる”SmartTool”などのように、作業時の倍力ではなく作業の器用さを補助するための技術開発や、Skeletonics によりパフォーマンス用の動作拡大外骨格スーツなどの開発が行われている。

[今後必要となる取組み]

「人機一体」を実現するためにはユーザーの意図を適切にセンシングし、作業対象の情報をユーザーの身体に適切にフィードバックする必要がある。そのためには視線計測、筋電計測、脳計測などの生体センシング技術、機械学習等による意図推定・行動予測技術、触覚フィードバック技術を統合することで、身体図の変容を容易にする手法の研究開発が肝となる。

またユーザーを知的に支援するため、Computer Vision 等による環境・行動認識技術、知的メディア処理技術、ウェアラブル技術などの研究開発の進展が望まれる。

(4) 科学技術的・政策的課題

米国では軍が主導しつつ大学や民間と連携し人間拡張工学の研究開発を行っている。歩兵や工兵を支援することにターゲットを絞っており、”Warrior Web”計画などが DARPA により行われている。

これに対し、日本国内では福祉や工場での作業や農作業の軽労化に向けた開発が主体となっている。日本におけるロボット工学やヒューマンインターフェースの開発水準は世界を先導しており、人間拡張工学においてもサイバーダイネ社が内閣府・最先端研究開発支援（FIRST）など国の研究支援を受けロボットスーツ”HAL”の製品化に成功し 2014 年 3 月 26 日には東京証券取引所マザーズに上場するなど当分野における存在感は高い。一方でリハビリテーションへの応用がドイツ国内では労災保険が認められるなど、日本国内での認可、規制のハードルの高さ故に海外での応用が先行しているのが現状である。

標準化に関してはサイバーダイネ社が ISO の医療用ロボットの安全性に関する基準策定に係るなど一定の存在感を有している。今後はさまざまな応用分野での標準化に関わる取り組みが必要となると考えられる。

今後人間拡張工学という新たな融合領域に対する研究開発支援を行うだけでなく、人間拡張工学特区の策定と特区での社会実験により、研究開発と市場開拓を促進するための政策的配慮が必要となるであろう。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

人間拡張工学に関わる国際会議 **Augmented Human Conference** が日米欧の研究者らにより 2010 年に仏ムジェーヴにて開催され、日本国内でも 2011 年東京、2014 年神戸などで開催されている。国際会議を経年的に運営する **Steering Committee** は 7 名中 5 名が日本人であり、我が国の研究者が中心となりつつ国際的な研究コミュニティが形成されている。

〔注目すべきプロジェクト〕

筑波大学では平成 25 年度より文部科学省博士課程教育リーディングプログラムとして「人の機能を補完し、人とともに協調し、人の機能を拡張する情報学」として岩田洋夫教授をプログラムリーダーとし、サイバーデザイン社 CEO を兼務する山海嘉之教授ら 33 名の教員らと「エンパワーメント情報学プログラム」を行っている。なお、山海教授は **FIRST** プログラム中心研究者を務めた後、革新的研究開発推進プログラム（**ImPACT**）のプログラムマネージャーとして、人と技術と社会が密接に連携し、工学・医学・法律・倫理の融合により、人の能力を支援・増幅・拡張する 21 世紀の人間支援型テクノロジーとして「サイバニクス」を位置づけ、継続的に研究開発を行っている。

2014 年には介入的な神経科学手法を用いることで身体認知、運動制御など、脳内の身体表現の解明とリハビリテーションへの応用を目指した東京大学 太田順教授を領域代表とする文部科学省科学研究費補助金 新学術領域「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」が採択され、人間拡張工学に応用可能な基礎的な知見に関する研究成果が期待できる。

北海道大学 田中孝之准教授は「軽労化研究会」を発足し、**Secure Assist**、**Sustainable Assist**、**Subliminal Assist** の 3 項目に着目することで疲労・労力の軽減に関する研究開発に取り組んでいる。

2014 年 10 月 10 日に慶應義塾大学稲見昌彦教授、中村伊知哉教授、東京大学暦本純一教授らを共同代表とし、「人機一体」の新たなスポーツの創成を目指した「超人スポーツ委員会」が発足し、人間拡張工学のスポーツへの応用を模索している。

2014 年 10 月 12 日に六本木ニコファーレにて、ウェアラブル機器を装着したプロ棋士がコンピューターソフトと連携しつつ対戦する「電王戦タッグマッチ」が開催され、西尾明六段 & ponanza タッグが優勝した。チェスでは「アドバンストチェス」と称する人機一体の戦いが行われ、コンピューターは人単独よりも強いタッグが誕生しつつあるが、将棋においても同様の試みが行われ始めた点は人間拡張工学の文化的側面としてインパクトがある。

（6）キーワード

Augmented Human、**Transhumanism**、**Posthuman**、**Human Computer Integration**、**Assistive Technology**

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	人間拡張工学基礎研究として身体性に係るスポーツ科学、人間工学、生理学などがあるが、理化学研究所の入来篤史、藤井直敬らやATR川人光男、神谷之康ら、東京大学中村仁彦ら、産総研持丸正明が身体運動や身体図式に関し活発に研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	人間拡張工学の応用研究領域としてウェアラブル技術やBrain Machine Interface ⁴⁾ を含むヒューマンインターフェース技術 (Human Computer Interaction) は研究者層が厚く、例えばACM Computer Human Interaction Conferenceにおける2009年から2014年の論文数は世界6位、アジアでは1位となっている。なお、Augmented Human Conferenceでは世界で1位となっており、今後当分野の周知が進むに連れ相対的に日本からの発表数は減ると考えられるが、数年は上昇傾向のトレンドが続くと想定できる。
	産業化	○	↑	パワーアシスト技術としてはロボットスーツに関連して、サイバーダインのHALが2014年に上場し、パナソニック子会社のアクティブリンクは、2015年から装着型のロボットの量産化を計画するなど産業化の芽は出つつある。またホンダも工場での作業員の補助を目指し体重支持型歩行アシストの開発を行っている。
米国	基礎研究	◎	→	1945年のVannevar Bushによるコンセプトの提案以来、サイバネティクスの一分野として連綿と研究開発が行われている。ロボットスーツとの連携のためのセンシングとしては力センサーを用いているものが多く、日本のサイバーダインの有する筋電センサーとの連携のノウハウに関しては日本に一日の長がある。しかしながら、マイクロニューロプログラムや脳計測技術、油圧サーボを中心とするアクチュエーター技術に関し米国の優位性は高い。
	応用研究・開発	◎	→	DARPAが音頭を取る産学軍の連携が密接に行われている。ロボット工学や自動運転技術に関するDARPAチャレンジの人間拡張工学版はいまだ行われていないが、ユタ大発のSARCOS社など大学発のスタートアップ企業が続々と誕生している
	産業化	○	→	日本のような工場や介護福祉用途ではなく、歩兵の強化を目的とした軍用技術として応用する試みが古くは1965年にGEによりプロトタイプが作成されたHARDIMAN以降継続的に行われている。
欧州	基礎研究	○	↑	特にフランスINRIAなどを中心として、Brain Machine Interface ⁴⁾ に関する研究が活発に行われている。また、スイスETHのSensory-Motor Systems Lab ⁵⁾ は、Assistive Technologyに関するEUでの拠点の一つとなっている。
	応用研究・開発	○	↑	ETHのProf. Robert Rienerが中心となり、Assistive Technologyに関する競技会Cyathlonの2016年開催を目指し、活動を行っている。このイベントがハブとなり、当該技術の応用に関する国際的な共同研究がなされることが期待される。
	産業化	△	→	人間拡張工学に関する取り組みは欧州では基礎的な研究が中心となっており、産業化への取り組みは緩やかである。なお、日本のサイバーダインのHALはドイツで事業を開始し、欧州で医療機器として認可されている。ドイツおよび米国は医療機器に産業化に関しては豊富なノウハウを有しており、人間拡張産業も同様のスキームを適用可能であると考えられる。自動車の電子化と同様人間拡張産業に関しても一気に巻き返しを図られる可能性が高い。しかしながら国内での社会展開は制度上の製薬が大きく進んでいない。よって我が国の法制度等の整備の遅れが人間拡張産業の空洞化につながる懸念がある。

中国	基礎研究	×	→	基盤技術のうち、ロボット工学に関する部分では研究例が散見されるものの、当該分野に関する研究は国際会議等の発表ではほとんど見られない。
	応用研究・開発	×	→	現状で応用に向けた研究開発事例はほとんど見られない。
	産業化	×	→	現状で産業化に向けた事例はほとんど見られない。
韓国	基礎研究	○	↑	ロボット工学、ヒューマンインターフェースに関する分野でKAISTを中心に活発に研究が行われている。2015年には当該分野のトップカンファレンスであるACM CHIのアジア初の招致に成功するなど研究者層、アクティビティ共に高い。
	応用研究・開発	○	↑	Samsung社は米国パロアルトの研究所にMIT Media Labなどから著名な研究者を多数招聘し、当該分野に関する応用開発を行っている。MIT Media LabにてSixth Senseを研究し当該分野のトップ研究者の一人であるPranav Mistryが本社の研究担当副社長に就任するなど応用研究は一層活発化すると考えられる。
	産業化	△	↑	現状で人間拡張工学に分類可能な製品カテゴリの実用化は行われていない。しかしながら、SamsungやLGを中心として、ウェアラブル技術、VR技術の延長として人間拡張工学に関し産業化も見据えた取り組みが行われていることが推察される。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 産総研デジタルヒューマン工学研究センター <http://www.dh.aist.go.jp/jp/>
- 2) Daisuke Sakamoto, Asian Researchers at the CHI Conference
<http://daisukesakamoto.jp/articles/Asian-Researchers-at-the-CHI-Conference/3/>
- 3) ロボットスーツ「HAL」の今後
<http://www.asset-alive.com/report.php?mode=show&repid=3106>
- 4) Brain Machine Interface (BMI) Group https://www.linkedin.com/groups/Brain-Machine-Interface-BMI-Group-4336499?split_page=5
- 5) Sensory-Moter Systems Lab, ETH <http://www.sms.hest.ethz.ch/>
- 6) Cyathlon <http://www.cyathlon.ethz.ch/>
- 7) CHI2015 <http://chi2015.acm.org/>
- 8) India-Born Pranav Mistry Named Samsung Electronics Vice-President; Key Facts of New Company Chief <http://www.ibtimes.co.in/india-born-pranav-mistry-named-samsung-vice-president-616536>

3.9.3 ハプティクス（触覚）

（1）研究開発領域名

ハプティクス（触覚）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

皮膚に対して人工的に与えた刺激がどのような感覚・体験を惹起し、人間のリアルタイムでの行動、思考、情動と相互作用するかを明らかにし、人間と情報環境およびその先にある実世界とのインタラクションに埋め込んでいく研究開発領域である。2000年初頭までは遠隔操作ロボットの触感伝送や、VRの触感生成を主な目的としていたが、近年はモバイル機器の操作性を高めるための振動フィードバックをはじめ、エンターテインメント、コミュニケーション、スポーツ、健康支援など、幅広い応用への関心が高まっている。3次元の世界を操作したり、身体的な体験を共有・支援したりする今後の情報メディアにおいて、ハプティクスは不可欠な要素である。

ハプティクスの研究領域は、人間の動作や意図を計測する計測技術、装着負荷が小さく、日常生活の中でも使えて身体各部を刺激できる触覚刺激デバイス、人間の運動と同期しながら効果的な刺激を行うための刺激パターン合成技術、それらを人間支援技術としてまとめあげるシステム化技術から構成される。これらの成果はウェアラブルデバイスや道具・機械の中に実装されたり、人間が生活する環境の中に埋め込まれたりして活用される。また、情報環境と人間がインタラクションするだけでなく、遠隔操作される機械が実世界とインタラクションする場合には、機械と環境との接触の状況をセンシングする技術も重要になる。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義・これまでの取組み〕

人間の触覚に関する工学的な観点からのハプティクス研究は、バーチャルリアリティー（VR）やテレプレゼンス研究の黎明とともに1980年代から始まり、2000年ごろから徐々に活発化し始めた。2005年にハプティクス研究に特化した国際会議 World Haptics が始まり、2008年に IEEE Transactions on Haptics が創刊、さらに、アジア地域を主体とする Asia Haptics の第1回大会が開催されたのは2014年11月のことである。このように、ハプティクスが学術分野として認知されるようになってきたのは比較的最近のことである。

ハプティクスの研究領域は、(1) 人間の触覚の物理的特性や、触覚の刺激に対して人間の脳や身体がどのように反応するかを解明する科学的研究、(2) 人間の触覚を効果的に刺激するデバイスや、その駆動方法についての技術的研究、(3) 触覚フィードバックを人間の活動に役立てるアプリケーション研究、を軸として進められてきた。

科学研究としては、物理的刺激に対する受容器の発火を神経電極によって観察し、特性を解明する研究や、皮膚表面の変形パターンと触感についての対応関係について2000年初頭ごろまでにおおむねその概要が明らかになった。触覚の空間的な解像度と時間的特性の解明、ファントムセンセーションや、実際の力学的刺激とは異なる触像をイメージしてしまう種々の錯覚現象、ゴムでできた手の模型を自分の手のように錯覚してしまうラバーハンドイリュージョンなども2000年前半までに報告されている。近年は、触覚単体での知覚特性だけで

なく、自身の運動や視覚刺激と触感との相互作用や、触覚刺激のもとでの脳活動計測、触覚を使った BCI 研究なども関心を集めているように思われる。

人間の触覚を刺激する工学的研究としては、Optacon のように視覚障害者に皮膚を介して記号情報を伝達する研究や、設置型の力提示デバイスによって VR の触感を本物らしく提示する研究が主要な研究分野を形成していた。PHANTOM や SPIDAR に代表される設置型の力提示デバイスとは、環境に設置されたアームの先端部などを手に持ちながらユーザーがそれを自由に動かし、触体験を行うタイプのデバイスである。これを手術シミュレーターに応用するための仮想臓器のモデリングと、アームが手に与える力学的フィードバックの計算方法などが主要研究テーマであり、現在においても重要な研究項目である。

これらの項目に加え、最近の 10 年間で活発に研究されたのが、小型振動体による振動刺激である。低周波から数百 Hz を超える周波数までをカバーする広帯域の振動体によって、クリック感やテクスチャだけでなく容器の中の小物体の存在や、ラケットの打撃感などもリアルに再現されることがデモされ、注目を集めた (TECHTILE)。また皮膚表層への電気刺激によって触覚を惹起するデバイス (電気触覚ディスプレイ) や、タッチパネル表面と指の間に電圧を印加し、静電吸着力を変化させることでテクスチャ感を提示するデバイス (Tesla touch) など、可動部をもたずさまざまな装置に容易に組み込める触覚提示法が提案されている。

2000 年代前半までのハプティクスの現実的なアプリケーションは、前述のような手術の訓練用シミュレーターや操作ハンドルなどの操作性向上であり、その他はリアルタイムフィードバックを前提としない製品表面の触感設計などが主要応用分野であった。単発的に触覚フィードバック付のマウスが発表されたことはあったが (2000~2001 年、米国および日本)、広く普及することはなかった。学術的な VR 研究以外で、一般の人々が触覚フィードバックに注目した最初の例は、2006 年に発売された任天堂社の Wii のリモコンにおいてであろう。リモコンからの振動フィードバックがゲームの楽しみを高め、ボタン選択などの操作性も向上させることを多くの人が体験した。学術的な振動触覚研究とも同期し、このころから実用的な情報メディアの中での触覚の活用が真剣に議論されるようになった。2007 年の World Haptics では、タッチパネルの映像と同期して振動が伝達することの効果 Edward Colgate らのグループによってデモされ、スマートフォンやタブレット端末の表面に触覚刺激を重畳する技術開発 (サーフェイスハプティクス) が各国で行われるようになった。

[今後必要となる取組み]

以上見てきたように、主にテレロボティクスや VR の基礎研究の一部として研究されてきたハプティクスは、2000 年後半からその活用領域の模索が始まり、現在その具体的な姿が明確になりつつある。以下に今後重点的な研究開発が必要と考えられる研究項目をまとめる。

1. 能動触動作の支援

タッチパネル型デバイスは、ボタンの配置などをプログラム次第で自由に変更できる点が最大の特長であるが、操作中いつも画面を見ていなければならない。これをブラインドタッチも可能な操作しやすいものにするに対するニーズは大きく、低消費電力で効果の高い

触覚フィードバックを確立することは喫緊の研究開発課題である。操作性向上だけでなく、接触時に指に振動を与えることによって接触物体の触感を伝達し、感性的価値を高めることも研究課題である。

さらにタッチパネルの次のインターフェースとして、空中映像を操作する3次元インターフェースが関心を集めており、実用的な空中映像結像技術も利用できるようになってきた。2次元面上のボタン位置を特定するのであれば触覚フィードバックは必須ではないが、自分の指と空中ボタンの奥行き方向の位置関係を正確に把握したり、空中映像を3次元空間の中で移動・回転する操作を直感的に行ったりするためには触覚の活用が不可欠であると考えられる。Touchable Holography が示したように、空中映像に超音波による非接触触覚刺激を重畳することで、手に何も装着しなくても触覚つきの3次元インターフェースを実現することが原理的には可能である。触覚フィードバックデバイスを指に装着するタイプも含め、3次元映像との触覚インタラクションは、今後の発展が期待される研究項目である。

2. 身体的体験の伝達・共有

例えば振動子を内蔵したデバイスを把持し、ゴルフあるいはテニスなどの試合の映像を見ながら選手と一緒に手を振ることを考えてみる。このときゴルフクラブやラケットがボールに当たる瞬間に選手と同じ打撃感が感じられる、という体験ができれば、スポーツ観戦がより楽しくなる（TECHTILE）。また、上手な選手の打撃タイミングなどを追体験することで、正しいイメージをつかみやすくなり、スポーツトレーニングにも活用できると考えられる。これらのシステムは、技術的には実現可能な段階にあり、今後はその普及のシナリオが重要となる。基礎研究においては、伝送可能な触感の幅を球技の打撃感以外にも広げていくことが課題である。

なお、手に対する局所的な刺激だけでなく、Vybe Haptic Gaming Padのように椅子の座面・背面などの広範囲にわたって振動を与える安価な全身型デバイスも商品化されている。触覚を伴う身体的体験を伝送・共有することで新たな体験を楽しんだり能力拡張に利用したりする時代はすぐそこまで来ていると思われる。

3. コミュニケーション

接触の感覚を伴う親密なコミュニケーションの実現もハプティクスの重要なアプリケーションである。Intouch で示されているように、必ずしも皮膚と皮膚との接触を忠実に再現しなくても、何らかの道具を介した運動や力の相互作用を伝達することで視聴覚だけでは得られない親密さを感じることができる。ハプティクスコミュニケーションだけを目的とした専用デバイスが普及した例はまだないが、ハプティクスの機能が埋め込まれた何らかのウェアラブルデバイスが普及した後であれば、それがコミュニケーション目的に活用される可能性は高い。ハプティクスコミュニケーションの普及のためには、その基礎技術を高めると同時にアプリケーション全体の可能性を俯瞰した上での普及のシナリオが重要である。

4. 健康支援

皮膚に対するマッサージは精神的なリラクゼーション効果や血行の改善、身体的疲労の低減などの効果を有しており、すでに生活の中に定着している。ウェアラブルな装置を用いた皮膚刺

激によって、緊張や疲労を伴う仕事の中で心身の状態を整えることができれば、自動車運転時の居眠り防止にとどまらず、仕事のパフォーマンス向上や、病気を未然に防ぐ予防医療としての効果も期待できる。これらを実現するためのデバイス技術・システム化技術の課題は、他のゴールを目指したハプティクスデバイスとおおむね共通していると考えられる。

5. リアルタイムの行動支援

把持した振動体を非対称に振動させ、触覚の非線形を用いて振動体からの引力を錯覚することで進行方向を指示する「ぶるなび」は、ハプティクスデバイスに身を任せるだけで正しい方向に歩行を導いてくれるナビゲーションが可能であることを示した。さらに Gyrocube や Traxion は、同様の把持型デバイスで手や指の運動を支持することを提案している。正しい動作や作業のコツは言葉や映像ではなかなか伝えられない。特に一つ一つを確認できない素早い動作中のコツは、自分自身の試行錯誤で見つけ出すしかないが、ハプティクスはそれらの伝達・教示を容易にしてくれる可能性がある。日常のナビゲーション、危険回避の伝達、操作方法の教示、スポーツやスキル伝達まで幅広い応用が考えられるが、特に高齢者になってからも新しい体験を継続し、健康長寿を達成するための支援技術としても期待が大きい。

以上の項目のほか、ロボットの遠隔操作支援のためにも新しい形でハプティクスが必要とされる状況が出現しつつある。日常生活の中にさまざまなロボットが入り込んでくると、それを遠隔で操作して多目的に活用したくなる場面が多くなると考えられる。そのときのロボットのナビゲーションや簡単な操作の際に、物体との接近を触覚刺激として提示することで、経路の指示や外界の操作が容易になる。

このように、3次元の世界を操作したり、身体的な体験を共有・支援したりする近未来の情報メディアにおいて、ハプティクスは不可欠な要素であり、今後の発展が期待される研究領域である。

（4）科学技術的・政策的課題

ハプティクスは、その重要性が近年認識され始めてきた研究領域であり、産業的にはデファクトスタンダードがまだ確立していない段階である。基礎的なハードウェア技術がシステム全体の成否を大きく左右するため、モノづくりを得意とする日本の強みを存分に生かすことができる技術領域であり、今後国内企業の優位性を確立すべき分野であると考えられる。ハプティクスの基礎研究においてこれまで日本が果たした役割は非常に大きいですが、その先の産業化においては、各企業の個別的かつ小規模な活動にとどまっているのが現状である。今後ハプティクス分野において国際的なイニシアティブを確保していくためには、デバイス技術開発から普及シナリオ策定まで、既存企業の枠を超えて強固に連携するための仕組み作りと、早期の重点的研究開発投資が不可欠であると考えられる。

ハプティクスデバイスはその要素技術として、かさばらず、装着が容易で効率のよいアクチュエーターを必要としている点では共通しているが、その利用目的、利用形態ごとに優先すべき要求仕様が異なってくるため、ハードウェアの基礎技術のみを切り離して研究開発するのではなく、最終的な利用形態と全体システムを常に意識しながら開発を進めることが肝

要である。

ハプティクスは、実際に体験してみないとその効果を実感することはできず、文書や映像・音声による成果共有が難しい。そのため、基礎技術開発を行う研究者から商品企画担当者まで、さまざまな役割をもつ開発者が常に触体験を共有しながら情報交換できる開発環境を整備することが肝要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 学術における動向としては、前述のように 2005 年に World Haptics が始まり、2008 年に IEEE Transactions on Haptics が創刊、2014 年 11 月に Asia Haptics が開始されている。
- ・ 触覚活用技術については、世界の情報技術をリードする企業がすでに活発に活動している。Microsoft、Apple をはじめ、ディズニーリサーチなども大学と共同しながら研究チームを立ち上げて活動している。欧州は伝統的に触覚の基礎研究が盛んであり、2009 年には欧州宇宙機関（ESA）内に Telerobotics & Haptics Lab が設立された。日本では各大学の研究室や、携帯電話関連メーカー、自動車関連メーカーなどが個別的に研究している段階であり、それらの組織化が急務と考えられる。
- ・ 世界の中でも韓国は早い時期から触覚関連技術に対する重点的な投資を行っており、サムスンをはじめ KAIST、ETRI、KoreaTech 等の研究機関においても活発な研究開発が行われている。

（6）キーワード

ハプティクス、触覚、力覚、身体性

（7）国際比較 （特に触覚インターフェースについて）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・1980年以降、ロボット触覚の研究を中心に多くの研究者が活動。 ・CRESTプロジェクト「さわれる人間調和型情報環境の構築と活用」 ・ハプティクス of 新しい応用を示唆する独創的な研究の多くは日本から発信されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・携帯端末メーカー、自動車関連産業による研究が活発化しつつある。 ・活動が個別的で、世界をけん引する力は生まれていない。
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・触覚フィードバック付カーナビゲーションシステムなどが商品化され始めている。 ・産業としての規模はまだ小さい。産業化を促す国家的支援が必要。
米国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・2000年初頭までは MIT Touchlabo が触覚基礎研究をけん引。外科手術シミュレーターの力覚提示技術開発などで世界をリード。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・触覚研究における世界標準デバイス Fantom を生み出した SensAble Technologies や、情報機器における触覚インターフェース開拓した Immersion などの企業が応用研究をけん引。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・企業間の買収などの動きは見られるが、本格的な産業化はこれから。 ・Micorsoft やDisney などが研究を活発化している。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・触覚の心理物理などに関する古典的基礎研究の多くは欧州で行われている。近年も Immersence Project (2010年まで) など欧州共同のプロジェクトが展開されている。2009年には ESA に Telerobotics & Haptics Lab が設立された。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・Senseg (フィンランド) などベンチャー企業の活発な活動が見られる。 ・ロシアでも触覚研究が始まっている。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・携帯端末用の触覚フィードバック付タッチパネルなどの産業化は始まっているが、本格的な展開はこれから。
中国	基礎研究	—		<ul style="list-style-type: none"> ・国際学会への論文投稿は見られるが、どれだけ本格的な研究が行われているかは不明。
	応用研究・開発	—		<ul style="list-style-type: none"> ・Microsoft Research Asia (北京)において応用研究を展開。
	産業化	—		<ul style="list-style-type: none"> ・不明
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・KAISTなどが中心となり基礎研究を展開。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・SAMSUNG を中心として研究開発が行われている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・すでに触覚フィードバック付の携帯電話が普及しているが、その先の本格的な産業化においてはやや停滞感もある。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

文中にあげた事例の詳細は、文中のキーワードで検索可能。

現在までの触覚関連技術の多くは以下の書籍にまとめられている。

- ・ 下条，前野，篠田，佐野 編：増補版 触覚認識メカニズムと応用技術 ―触覚センサ・センサディスプレイ―，S&T 出版（2010 年初版、2014 年増補版）

3.9.4 ウェアラブルコンピューティング

(1) 研究開発領域名

ウェアラブルコンピューティング

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

コンピューターを身体に装着して利用するウェアラブルコンピューティングは、コンピューターをポケットやカバンに入れて持ち運んで利用するモバイルコンピューティングと違って、日常生活や業務の中で常時利用するものである。便利・快適、安全・安心、さらには豊かで楽しい生活や業務が新たにもたらされるものと期待される。現時点ではまだ普及しておらず、具体的な使い方や必要なスペックが明らかでないと同時に、利用者の側の利用技術の向上も必要である。コンピューターの小型化、軽量化、バッテリーの持続性、インターフェース、コンテキスト推定、汎用プラットフォームの構築などの研究開発課題がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

ここ 20 年間のインターネットとモバイルデバイスの浸透によりいつでもどこでも情報環境を用いてコミュニケーションや情報利用を行えるようになってきた。それにはコンピューターの小型化、高性能化が重要な役割を果たしてきたといえるが、コンピューターはこれからさらに小さくなる。これまで、コンピューターはその出現以来、サイズが小さくなって使い方が変わってきた。軍事利用、科学技術利用から業務利用、個人利用へと変わり、今さらに小さくならうとしている。このとき、スマホに代表されるモバイルの次のステップとして、身体にそのコンピューターを装着して利用するウェアラブルコンピューティングを考えることは自然である。ウェアラブルの形態でコンピューターを利用できるようになると以下のようなメリットがもたらされる。

- ・活動時利用：何かをしながらコンピューターが利用できる。情報提示など。
- ・常時利用：一日中コンピューターが利用できる。ライフログなど。

これらのことから、これまでのスマートフォンやパソコンとは異なる、人々の暮らしや仕事などの実世界での活動に深く関わる新しい情報利用が可能となる。典型的なデバイスとしては、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）をはじめとするめがね型デバイス・カメラ、腕時計型デバイス、チェストベルト型デバイス、指輪型デバイス、帽子型デバイス、イヤホン型デバイス、靴型デバイス、皮膚貼り付け型デバイス、シャツ型デバイス、ベルト型デバイスなどがある。

暮らしの中での利用目的として以下の3点が重要である。

- ・便利・快適
- ・安全・安心
- ・豊か・楽しさ

これらにより、人々の普段の生活の中の何気ないところで頻繁にウェアラブルコンピューターが利用されるようになり、その結果として人々のくらしが根幹から変革する可能性がある。

一方、仕事の中での利用方法としては、現在机の前でコンピューターに向かっている人以

外のすべての人、主として現場で業務を行っている人が利用することになる。土木・建築作業、保守点検、製造、流通、小売り、農林水産業、消防、医療・介護などがそれに含まれる。ウェアラブルコンピューティングの導入により現場業務の効率が革新的に改善される可能性がある。

〔これまでの取り組み〕

ウェアラブルコンピューティングには長年にわたる歴史がある。HMD の出現は 1960 年代にまでさかのぼる¹⁾。HMD を含めてそれ以降の長い期間にわたって、米国では軍事用のデバイス、システムが開発されてきた。戦闘機やヘリコプターの操縦士や陸軍兵士などが現場で活動しながら暗視カメラ映像や司令部からの指示、現地の地図などの情報を得たり、現地映像を司令部に送ったりするのに用いられてきた。

1980 年代になって米国 MIT で Pentland 教授率いるウェアラブル研究グループが立ち上がった²⁾。当時の学生には、後にアカデミックにおけるウェアラブル分野の先導者となっている Georgia 工科大の Thad Starner 教授や Tront 大の Steve Mann 教授が含まれる。1990 年前後には、ウェアラブルコンピューターの Xybernaut 社や HMD の MicroOptical 社が設立され、ウェアラブルコンピューティングをビジネスとして立ち上げる兆しが見られた³⁾が、いずれも大規模な販売に至らなかった。HMD やウェアラブルインターフェースなどに関する基本特許が多数とられたのもこの時期であるが、2010 年ごろから 20 年の存続期間の期限を迎え、いくつかの基本的なものは徐々に失効している。1995 年には任天堂が HMD に似た卓上型の覗き込み型 3D ディスプレーを備えたゲーム機「バーチャルボーイ」を販売したが販売が香ばしくなく失敗に終わった⁴⁾。1996 年にソニーの HMD「Glasstron」、1998 年にオリンパスの HMD「Eye-Trek」が発売され⁵⁾⁶⁾、携帯型 DVD プレーヤーなどのビデオソースにつなげて新幹線などで映像視聴ができることを売り文句に数年間にわたって販売が行われたが、市場が拡大せず 2000 年を超えて両社とも撤退している。

2000 年代になってからも数々のアプローチがとられている。2001 年には島津製作所が単眼 HMD「DataGlass 2」を発売し⁷⁾、NPO ウェアラブルコンピューター研究開発機構でそれを用いたオートバイレース支援やウェアラブルファッションなどのプロジェクトが行われ⁸⁾、テレビや雑誌などのメディアでも新しいコンピューターの利用スタイルとして騒がれた。2002 年にはそれを用いて端末を付け加えた業務機「WIA」を日立製作所が発売した⁹⁾が、販路を拡大できず撤退している。2008 年にはニコンが民生製品として単眼ビデオビューア UP（ユーピー）を発売した¹⁰⁾。宣伝やコンテンツ拡充がはかられたものの功を奏せず、2 年程度で撤退している。海外でも欧米、台湾などからいくつかの HMD が出されている。

このような数々のアプローチに反してウェアラブルビジネスが立ち上がってこなかった理由は、デバイスの問題、システムの問題、インターフェースの問題、バッテリーの問題、アプリケーション・コンテンツの問題、安全性の問題など、数多くの問題があったためであり、これらたくさんの課題の解決が実用レベルとは程遠かったためであると考えられる。

2012 年に Google Glass が発表されて状況が一変した¹¹⁾。従来の問題の多くを一気にクリアし、驚くほどの超小型、高性能、高機能なデバイスに Google のもつ Android、クラウド技術などを統合してきたのである。Google Glass は 2013 年にデベロッパー向けに販売され、2014 年には限定的に一般販売されたが、レストランや映画館でのカメラの利用の社会問題

や発熱の問題、バッテリーが持たないという問題などが露呈し、2015年1月に販売が終了となっているが、子会社 Nest の Tonny Fadell の監督下で再生が図られるという¹²⁾。

一方では2015年1月に Microsoft が Windows 10 の発表を行い、その中で HoloLens というヘッドマウントディスプレイとそれを用いた AR プラットフォームの発表を行った¹³⁾。シースルーめがね型デバイスとそれを用いた屋内 AR 環境が示されており、高度な AR を実現するのに必要ないくつかの API が提供される見込みである。Windows と Xbox、Kinect という Microsoft のキラー技術を引っ提げてウェアラブルと HMD の世界に切り込んできたという印象である¹³⁾。

腕時計型デバイスも古い歴史がある。1980年代から、セイコーやカシオ、シチズンなどの腕時計メーカーからさまざまな機能を持った腕時計型コンピューターが開発、発売されている¹⁴⁾。スマートウォッチと呼ばれる高性能な腕時計型コンピューターが発売されるようになったのは2012年ごろからである。一方で同じころからブレスレット型活動量計という機能を絞ったウォッチデバイスが出現し、短期間で数百万台規模のマーケットを立ち上げた。

2014年には Google がスマートウォッチを主なターゲットとした Android ベースの OS である Android Wear を発表し、サムスン、LG などから数種類の対応ウォッチが出された¹⁵⁾。2014年の秋には Apple Watch が発表され、2015年4月に大規模に発売される見込みとなっている¹⁶⁾。

[今後必要となる取組み]

Apple Watch の成否にもよるが、2015年はウォッチの実用化が本格的に進む年となりうる。現時点ではバッテリーの寿命が最重要課題の一つである。アプリケーションとしてはスマホ連携による通知機能が主なアプリケーションとなっているが、次に立ち上がるべき健康系のアプリケーションがキーとなる。さらにその先には街角での情報サービスがあり、どのようにしてそれを立ち上げていくかがビジネスとしてのポイントとなりうる。

めがね型デバイスも2015年内に徐々に立ち上がってくる可能性がある。前述の Microsoft の動きのほか、米国では Recon、Vuzix が新機種を出してくる可能性が高いのと同時に、ヨーロッパ勢も Optinvent や GlassUp などの商品が発売される見込みである。日本では、ウエストユニティス、テレパシー、ソニー、ブラザーなどがこの分野に積極的である。大手コンピューター企業である日立、東芝、富士通は業務用の HMD を投入してくることを表明している。一度失敗している NEC も再び参入してくる可能性がある。いずれにしても、どのような利用方法をターゲットにしてどのようなデバイスを出していくかが重要である。Google Glass の高機能、高性能なスペックはポテンシャルな用途を広げるのに有効であったが、実際の現場で使われていくためにはバッテリーの寿命や操作方法、装着性などの実用性を高めることが必要であり、スペックの「落としどころ」が難しいというのが現状である。

最近ではウォッチ、めがね以外のウェアラブルデバイスもたくさん出現している。前にも述べたとおり、帽子、イヤホン、指輪、ネックレス、絆創膏、靴、チェストベルトなどである。これらはセンサーと無線通信を内蔵した専用品が多い。よいところに目を付けてさまざまなウェアラブルデバイスを生み出していく必要がある。

過去にもたくさんの先行研究や開発事例があるものの、それらはそのときどきのデバイス

や計算環境を用いたものであったため、現在とは取り巻く環境が異なるため、あらためて同じようなシステム、インターフェース、応用研究を現行の環境下でうまく進める必要がある。システムプラットフォームやインターフェースは特に重要であり、これからさまざまなトライアルが行われ、少しずつ淘汰されて、群雄割拠の時代へと突入することが想定される。

ウェアラブルコンピューターは現場で利用されるものであるため、ノウハウや継続性も重要である。ウェアラブルデバイスやその実際的な使い方に関するノウハウを持つ熟練者の養成が必要である。企業にとっては継続的な取り組みが何よりも重要であり、これまで経験の少ない一発勝負が失敗している。低リスク、低コスト、短サイクルで回収しながらビジネスを回していくことが重要であろう。

また後述のように、ウェアラブルコンピューティングにはさまざまな技術的、社会的な課題があり、そのすべてが立ち上げのためのポイントとなりうる。問題はどのレベルのものでどれくらい売れるかという点にある。たくさんのトライアルの中から成功シナリオが出てくる上、それがベースとなってさらに次々と新たな成功が積み重なってゆく展開が見込まれるため、KickStarterをはじめとする米国におけるクラウドファンディングの仕組みはこのようなさまざまな新しい取り組みを評価し選別していくビジネススキーマとして非常に適合している。Moff バンドやログバーRingなどの日本発のベンチャー企業も世界から注目されている。クラウドファンディングで成功し商品化にたどり着くケースは、これからも増えていくのではないだろうか。大企業もたくさんの矢を打つことができれば本来は成功しやすいはずである。

材料、光学、機械、エレクトロニクス分野ではもともと日本企業は高い技術を有するので、それらをうまく活用しながら完成度の高い完成品を作ることにもまた日本企業の強みである。ブロードバンド基盤、消費者レベルなどの点で日本にはまだまだ優位性があり、この分野に積極的に取り組んでいくことが望まれる。

ウェアラブルを日本から立ち上げる上で重要な点として、国全体のムードが挙げられる。スポーツ、産業用などで国策、あるいは地域から立ち上げていくことが有効である。実際、自治体の政策のなかでは、産業振興、産業誘致、観光、行政サービス、交通、農林水産業、工業、サービス業、医療、福祉などさまざまな側面でウェアラブルデバイスの活用は有効性があるものと考えられ、そちらのほうからも積極的な取り組みが望まれる。これまで、福井県・鯖江市、鳥取県、島根県、神戸市、広島市、福岡市、大阪市などがウェアラブル関連事業に積極的な取り組みを見せている。

（４）科学技術的・政策的課題

ウェアラブルコンピューティングにおいて最も難しい課題は展開シナリオである。アプリケーション、サービスの波及範囲は膨大であるが、どこからスタートしてどのように展開するかはビジネス的な問題としては最も重要な点である。それが実は技術的な側面と密接に関連性があり、技術で可能な範囲でうまくアプリケーションを構築していくデザインの問題であるとも言える。

具体的な技術課題のなかでもバッテリーおよび充電方法は最も重要なものの一つである。小さく、しかもバッテリーが持つようにすることがのぞまれるがそれは相反する要求である。充電もいつどのタイミングでどのように充電するのか、充電器の大きさや重さも重要なポイ

ントとなる。

次にセンシング技術が注目されている。先にも述べたが生体情報センシングはウェアラブルコンピューティングにおける健康系のキラアプリケーショを構築する上では必須の技術となるが、その精度をどこまで高められるかが課題である。特に最近注目されているのが血中酸素飽和度、血圧、血糖値である。非侵襲で小型のセンサーであれば、医療レベルの精度になくとも生活する上で有益なサゼスチオンを生成することができる可能性がある。

3番目に装着性の問題がある。重さ、装着方法、素材などは日常装着する上では重要なポイントとなる。長期間にわたって装着しないと不具合がわからない場合もあり、使い方によって結果が変わってくる点などが難しいところである。

4番目に操作方法が挙げられる。究極的にはセンサーなどを用いて操作なしに必要なコンピューティングが勝手に行われることが望ましいが、ユーザーの意図が正しく推定できる技術レベルに至るまでの間は、ユーザーによる操作が必要となる。ハンズフリーのものから片手で入力するもの、両手で入力するものなど、シーンに応じて使い分ける必要がある。

5番目に、システムプラットフォームの問題がある。デバイスやアプリケーションに依存しないシステムプラットフォームで、まだ見えていないウェアラブルアプリケーションの共通部分を効率的にサポートし、異なるアプリケーション間で必要なデータを共有し、プライバシーやセキュリティーを考慮して情報管理できるものが求められている。複数のデバイス間で情報や通知が必要に応じて必要な精度で交換され、クラウド上で適切に管理されなければならない。さらに、広域的なAR空間を構築する場合には複雑な分散空間情報管理が必要となるが、そのようなシステムはまだない。

最後に、社会問題と安全性の問題も解決すべき問題である。HMDに関しては、目や脳への人体影響に懸念がある。眼精疲労、注意の転導、転倒時の危険なども考慮する必要がある。ウェアラブルカメラに関しては、プライバシーの侵害という非常に重要な社会問題がある。HMD、カメラに共通の問題として不正利用、犯罪利用（盗撮、カンニング等）が挙げられる。社会の制度やビジネスとして解決することが考えられるが、それと同時に、技術によって解決できるものはそうしていく必要がある。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

Apple Watchの成否は今後のウェアラブルデバイスの方向性を特徴づけるものと考えられる。本稿執筆時点ではまだ十分には公開されていない具体的なスペックやアプリケーションとしてどのようなものが備えられているかはこの分野の展開を見る上では非常に重要である。それを見てAndroid Wearなどのほかのウォッチも変化してくることが考えられる。

Google Glassの次バージョンが出てくるかどうか注目すべき点の一つである。開発者バージョンで得られた知見をもとに、大きく改良されたバージョンが広く一般販売されるようになれば、サービスも増え、この分野が一気に加速すること可能性がある。Intelがこの分野への進出を図っており、北米企業のRecon、VuzixへのIntelの出資も重要なニュースである。Google GlassでIntel CPUが使われるかもしれないといううわさもある。HMD分野でIntelのCPUが広く使われるようになると状況は変わってくる。IntelはQuarkというローエンドCPUも発表している。ウォッチやセンシングなどを行うその他のウェアラブル

デバイスをターゲットにしているようである。

前述のように日本の大手コンピューター企業である日立、東芝、富士通がそろって産業用 HMD に名乗りを上げている点も注目すべきである。産業用 HMD の展開は日本で急速に進む可能性がある。

〔注目すべきプロジェクト〕

ヘルスケア系のプラットフォームとして Apple の HealthKit が発表されている。多数のヘルスケアデバイスで取得されたデータを多数のアプリケーションで共有する共通プラットフォームであり、ヘルス系のアプリケーションの急峻な立ち上がりが予見される。Google はかねてより実施していた Google Health サービスを終了し、新たなヘルスケアサービスとして Google Fit を発表している。Microsoft は以前より HealthVault というヘルスケアサービスを実施しており、3 社によるプラットフォーム争いの激化が想定される。

2015 年 1 月 14 日~16 日に東京ビッグサイトでウェアラブル EXPO（主催：リードジャパン）が開催された。世界初のウェアラブルに特化した展示会であり、100 以上企業の展示があった。2016 年も同じ展示会が規模を拡大して開催される見込みであるとのことである。2015 年 9 月には博報堂や朝日新聞などの運営でウェアラブルテックエキスポが開催される。今後、日本での展示会などでウェアラブルデバイスの出展には注目すべきである。

2015 年 9 月に大阪で ISWC/UbiComp2015 が開催される。ISWC(International Symposium on Wearable Computers)は 20 年近くにわたって開催されているウェアラブル関連のトップカンファレンスであり、内外のウェアラブル関連のトップ研究者が集まるため、ウェアラブル産業への注目が高まるこのタイミングの新たな研究成果には注目すべきである。

NPO ウェアラブル環境情報ネット推進機構（WIN）は、東京大学名誉教授の板生清氏が中心となって 10 年以上にわたり活動している NPO でさまざまなウェアラブル関連のプロジェクトを始動している¹⁷⁾。人間情報学会、ネイチャーインターフェース株式会社と連携して活動しており、講演会や雑誌発行などの活動を行っている。NPO ウェアラブルコンピューター研究開発機構（チームつかもと）はウェアラブルコンピューティングの普及推進を目指して会合や展示などを行っている¹⁸⁾。日本ウェアラブルデバイスユーザー会（WUG）は 2014 年に立ち上がった。ユーザコミュニティとして規模拡大を狙っていると同時に、NPO 設立を目指している¹⁹⁾。

（6）キーワード

ヘッドマウントディスプレイ、透過型・非透過型、導光板、マイクロディスプレイ、スマートウォッチ、非侵襲型生体センサー（センサー脈波、血中酸素飽和度、血糖値、体温、発汗、心電、筋電、脳波）、IoT (Internet of Things)、CPS (サイバーフィジカルシステム)、M2M (Machine to Machine)、i ビーコン、NFC、IMES、GPS、加速度センサー、ジャイロセンサー、人体通信、非接触充電、Qi (チー)

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	行動認識やユーザーインターフェースの分野など、国際会議での発表は多い。ISWC2015が大阪で開催されるため研究コミュニティは盛り上がっている。神戸大、東大、大阪大、名古屋大、NTT、NTTドコモ、日立など。装着向けの材料研究としてERATO染谷プロジェクトがある。
	応用研究・開発	○	→	健康、スポーツ、産業用などの応用分野において国際会議での発表は多い。アップル横浜研究所が設立される予定でありさまざまな応用技術の開発が行われるものと見られている。神戸大、名古屋大、NTT、日立など。慶応大・東大を中心に超人スポーツ委員会が立ち上がった。
	産業化	◎	→	中小、ベンチャーとしてはTelepathy、ウエストユニティス、ブリリアントサービスのHMD、Moffの腕輪型デバイス、ログバーのRingなど。大手ではエプソン、ソニーは積極的に民生用商品を手掛ける。産業用で富士通、東芝、日立。Google Glassやウォッチの部品は多数。化学材料、金属材料、光学部品、受動部品等の要素技術を持つ。NPO WIN、NPO チームつかもと、WUGなどNPO等の産業振興活動も目立つ。
米国	基礎研究	◎	→	古くから研究は盛んであり、世界をリードしている。ジョージア工科大、トロント大、CMU、UCBなど多くの大学が関与している。Google Glassのプロジェクトには多数の米国の大学関係の研究者が関わっている。Google、Microsoftのメディア処理などは世界的に先進的である。
	応用研究・開発	◎	→	健康管理、産業用、軍事用も含めて研究盛ん。Google Glassを用いた応用研究などが多数行われている。MicrosoftのHoloLensはAR分野の展開に拍車をかけるものと思われる。DARPA（米国防総省）では30年以上にわたって軍事用ウェアラブルコンピューターの研究を進めているが、ここ2、3年はウェアラブルロボットスーツの研究開発が目立っている。
	産業化	◎	→	Google Glass、Apple Watchは業界のけん引役となっている。シリコンバレーを中心にベンチャーの立ち上がりやクラウドファンディングも盛ん。MicrosoftやIntelも研究分野では古くから参入しており、ビジネスとしても最近力を入れ始めている。広くプラットフォームを握っているのがビジネス的な影響力が大きい。
欧州	基礎研究	◎	→	ファブリックの研究が盛ん。画像処理、行動認識、ユーザーインターフェースなども。スイスETH、イギリスランカスター大、ドイツカールスルーエ工科大、ダームシュタット工科大、アーヘン工科大、パッサウ大など。
	応用研究・開発	○	↑	医療、ヘルスケアなどの分野がスイスETHなどで盛んに行われている。EUのHORIZON2020はFP7の後継としていくつかの研究分野を促進しているが、なかでも個人向けヘルスケアシステム・サービス分野(PHC27、PHC28)ではウェアラブルデバイスを視野に入れ、注力しているようである。
	産業化	◎	→	ウォッチやスポーツを中心にファッション的な取り組みが盛んである。フランスやイタリアではHMDも盛ん。
中国	基礎研究	△	↑	画像処理、インターフェース、行動認識などはMicrosoftアジア研究所で行われている。大学等の研究機関での研究はまだ弱い。
	応用研究・開発	×	↑	健康分野などはMicrosoftアジア研究所で研究が行われている。大学等の研究機関での研究はまだこれからのものである。
	産業化	◎	↑	レノボ、ファーウェイ、シャオミなどウォッチ、リストバンド系で低価格市場を立ち上げている。台湾ではTSMC、ホンファイ、ASUS、クアンタコンピュータ、Acer、HTC、NVIDIAなど、デバイス、製造、完成品など幅広くこの分野をリードしている。

韓国	基礎研究	○	↑	行動認識やユーザーインターフェースの研究がKAIST、中央大学院、韓国電子通信研究院などで行われている。
	応用研究・開発	○	↑	コンテキストウェアサービス。KAISTなど。
	産業化	◎	↑	サムスン、LGがスマートウォッチ市場でリードしている。

(8) 引用資料

- 1) Ivan Sutherland <<Head-Mounted-Display>>, MediaArtNet,<http://www.medienkunstnetz.de/works/head-mounted-display/>
- 2) Meet the Godfather of Wearables, The Verge,
<http://www.theverge.com/2014/5/6/5661318/the-wizard-alex-pentland-father-of-the-wearable-computer>
- 3) MicroOptical and Xybernaut Partner to Create Wearable Computing Solutions for Mobile Workers, Business Wire,
<http://www.businesswire.com/news/home/20030320005389/en/MicroOptical-Xybernaut-Partner-Create-Wearable-Computing-Solutions#.VNxuQvmsV8E>
- 4) VirtualBoy, 任天堂, <http://www.nintendo.co.jp/n09/vue/>
- 5) 新製品「場所をとらずに5.2型相当の迫力ある映像が楽しめるパーソナルLCDモニター“グラストロン”発売」, ソニー報道資料,
http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press_Archive/199606/96CI-075/
- 6) Eye-Trek Q&A, オリンパス,
http://www.olympus.co.jp/jp/support/cs/HMD/support/faq_index.html
- 7) 「単眼ヘッドマウントディスプレイ」販売終了のお知らせ、島津製作所,
<http://www.shimadzu.co.jp/hmd/>
- 8) プロジェクト紹介（鈴鹿 8 耐）、NPO ウェアラブルコンピュータ研究開発機構（チームつかもと）、
<http://www.teamtsukamoto.sakura.ne.jp/project/suzuka8h/suzuka8h.html>
- 9) 業務用ウェアラブル・インターネット・アライアンスを日本国内向けに発売、日立の概要・ニュースリリース、<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/2002/0115a/>
- 10) メディア ポート「UP300x」、「UP300」の発売について、ニコン報道資料、
http://www.nikon.co.jp/news/2008/1007_up_01.htm
- 11) Google Glass, <http://www.google.com/glass/start/>
- 12) リストラ後の Google Glass はトニー・ファデルの監督下に、WIRED.jp,
<http://wired.jp/2015/01/19/google-glass-graduates/>
- 13) Microsoft「HoloLens」の第一印象--かつてないAR体験を実現するヘッドセット、CNET Japan、<http://japan.cnet.com/news/commentary/35059369/>
- 14) Digital Watch,
<http://www.dentaku-museum.com/hc/computer/degitalwatch/degitalwatch.html>
- 15) Android Wear, Google,
http://www.android.com/wear/?brand=CHMA&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=ip-wear-bkws&utm_content=search-bkws

- 16) Apple Watch, Apple,
<http://www.apple.com/jp/watch/?cid=wwa-jp-kwg-watch-com>
- 17) 特定非営利活動法人ウェアラブル環境情報ネット推進機構、<http://www.npowin.org/j/>
- 18) 特定非営利活動法人ウェアラブルコンピューター研究開発機構、
<http://www.teamtsukamoto.sakura.ne.jp/>
- 19) 日本ウェアラブルデバイスユーザー会
<http://w-ug.jp/>

3.9.5 HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）

（1）研究開発領域名

HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）

（2）研究開発領域の簡潔な説明

人とロボットの間でのインタラクションについて研究する分野。Human-Computer Interaction、認知科学、人工知能、ロボット工学、自然言語処理、デザイン、社会科学などの知見や手法の融合分野。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

研究の立場

HRI（ヒューマン・ロボット・インタラクション）の研究は、工学的視点に立って人間と共生できるロボットシステムの構築を目指す立場と、科学的視点に立って人間のコミュニケーションにおける行動規範を明らかにする立場とがある。前者は、ロボットに必要とされる機能と、その実現方法を明らかにすることを目指し、後者は、ツールとして（ヒューマノイド）ロボットを用いながら人間の機能を探る。このような特性から、本領域は、認知科学、人工知能、ロボット工学、自然言語処理、デザイン、社会科学などの広範な研究領域が融合している分野となる。基礎的研究としては、コミュニケーションに利用される言語・非言語（視線、姿勢、ジェスチャー、対人距離、等）の理解と生成方法の検討や、さまざまな言語・非言語行動の間に存在する制約・相互関係の解明に関する研究が継続的に行われている。アプリケーションの視点に立った研究では、ロボットが社会に進出していくことを念頭において、高齢者支援や教育、公共スペースでの案内など、実際の用途やその際の問題について扱っている研究などが多く行われている。また、それぞれの立場からインタラクションの評価方法そのものを議論する研究や、文化ごとのロボットの社会的受容の違いの分析などの研究も多い。代表的な学会としては、IEEE/ACM Human-Robot Interaction¹⁾、ICSR²⁾、またマルチモーダルな情報処理を扱う ICMI³⁾、バーチャルエージェントに関する IVA⁴⁾、対話処理を扱う SIGDIAL⁵⁾なども関連する学会として挙げられる。

基礎的研究

人とロボットが共存し自然なインタラクションを行う上での必須の機能として、視線や表情、ジェスチャーなどの非言語情報の理解と生成について詳細に検討されている。特に、インタラクション中の視線制御の機能分析に関する研究は伝統的に多い。例えば、複数人のユーザーとユーザーとロボットが会話的インタラクションを行っている状況において、ロボットの視線配布による発話対象の意図表出や、物の手渡しタスクなどの状況における視線の機能などが古くから検討されている。また言語と非言語行為の組み合わせによる意図の理解・生成についても検討が進んでいる。早稲田大学においては、ロボットを用いた会話プロトコルの研究が行われている。すなわち、会話システムが人と同じ身体を持つことを物理レイアのプロトコルに位置づけた上で、うなずきや、視線、姿勢などをトランスポート、セッションレイア相当の役割を与え、効率的な会話が行われるための約束事を明らかにしている。同大学は多人数で構成されるグループ会話に参加できるロボットの草分け的存在であり、近年

では単にグループ会話参加するにとどまらず、グループ会話のファシリテーションを行う機能を実装している⁶⁾。Microsoft Research は、Open-World Dialogue プロジェクトにて、会話参加者が動的に変化する環境で多人数会話を実現している⁷⁾。また欧州でも、英エディンバラ大学を中心にした国際的共同研究プロジェクト JAMES (Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems) が進行中である⁸⁾。JAMES では、発話権の授受のモデル言語理解、会話戦略、話題（ニュース等）推薦、相互イニシアティブ (Mixed-Initiative) モデルなどがより詳細に検討されている。また、主に公共スペースにおいて人間とロボットが同伴歩行するような状況を想定して、適切な対人距離の制御なども検討されている。

ロボットのパーソナリティー（ロボットのパーソナリティーに基づく言語・非言語生成方法、等）や身体性（ロボットの身長の影響、言語的行為と自由度の数の関係、等）に関しての考察なども行われている。また、それらの社会的受容の違いについても議論されている。またそもそもロボットが人間のような存在として認識されているか、あるいは単に道具として認識されているかを文化ごとに分析している研究なども行われている。これらの基礎的検討については、HRI 学会等において特に米国のカーネギーメロン大学 Human-Computer Interaction Institute および Robotics Institute²⁶⁾、ウィスコンシン大学マディソン校の Human-Computer Interaction Group²⁸⁾などからの発表が近年多く見られる。また EU (Paris Tech 他)、日本 (ATR 他)、韓国 (ソウル大他) の研究機関からも継続的に報告されている。

応用的研究

応用的研究としては、主に子供のための教育支援や高齢者支援、人とロボットの物理的共同作業などに関して検討している研究が多く見られる。また、テレプレゼンス・ロボットに関する研究や、飛行ロボット（ドローン）と人のインタラクションに関する研究も増えてきている。また、一つのロボットで獲得された対人スキルを他のロボットと共有できるようなクラウド・ロボティクスの研究も行われている。

教育に関しては、ロボットに教師役を担わせて子供に学習の動機付けを試みるものが多い。例えば、ロボットがその身体性を生かして何らかのインストラクションを行ったり、共感的行動やユーザーごとのパーソナライゼーション（言語や非言語のスタイルをユーザーに合わせる等）を行うことで学習意欲を向上させるなどの試みがされている。高齢者支援に関しては、ロボットを用いてケアスタッフと高齢者間の交流を促進するものや、ロボットとのインタラクションを通して創造的な思考を喚起するようなものがある。また、高齢者に物理的に薬を渡すための安全な動作制御の検討なども行われている。この物理的共同作業については、新しい動作軌跡の教示の方法や、安全な動作制御の検討、協調作業のための動作計画、作業達成のための効果的な視線配布やジェスチャーの検討などがされている。

テレプレゼンスに関しては、主に遠隔にあるロボットを直感的に扱うためのインターフェースが検討されている。最近登場した飛行ロボットは、上空から景色を撮影するなどに用いられることが多いが、低空を飛ぶ飛行ロボットと人との社会的なインタラクションを試みるものも出てきている。クラウド・ロボットについては、EU の RoboEarth プロジェクトが継続されている⁹⁾。ロボットの動作モデルや周辺環境の知識に関するデータベースを蓄積し、あらゆるロボットでそれらの知識を共有できることを目指しており、ロボット間の知識共有

や、協調作業のデモンシステムも報告されている。

（４）科学技術的・政策的課題

・ ロボットを用いたアプリケーション・デザインの重要性

ロボット・プラットフォームが一般向けに多く販売されるようになり、数年前まで基礎研究レベルだったことも廉価で高性能なセンサーデバイスで容易に実現できることも多くなった（ユーザー位置推定、視線認識等）。応用的な研究を行うのに十分な環境はそろってきていると言え、今後は、実際のタスクも想定した研究テーマの策定が重要である。ビジネスとしても参入障壁はかなり下がってきているため、広く利用されるサービスのデザインが真剣に検討されなければならないだろう。

・ HRI 関連の事業化支援

EU では、Horizon2020 経由で巨額のロボット関連研究開発・事業化予算が投入されている（SPARC robotics project : 28 億ユーロ規模）¹⁰⁾。米国はもとよりシリコンバレーを中心にベンチャーキャピタルを元手にした研究機関からのスピアウトが多いが、HRI 関連分野も例外ではない。日本のロボット技術は世界トップレベルと言われて久しいが、このように長期的視点に立った大規模な事業化支援についてはすでに欧米に後れをとっていると言え、今後の政策的課題である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

・ 企業がプラットフォームを本格提供開始

2014 年は、いくつかの企業が人間との社会的インタラクションを目的としたロボットの開発プラットフォームを本格提供開始した。日本ではソフトバンク・ロボティクス社の Pepper（仏アルデバラン社との共同開発）¹¹⁾¹²⁾、米国 MIT Media Lab からスピアウトした Jibo 社の Jibo が 2014 年夏に相次いで発表された¹³⁾。Pepper は 30 自由度の機構を有し、3D センサー、タッチセンサー、ジャイロセンサー、レーザーセンサーなど、人間とインタラクションする上で必要なセンサーが実装されている。一方 Jibo は 30 センチ弱の身長で 3 自由度の機構と顔部にディスプレイを持ち、従来のヒューマノイドとは違って社会的なインタラクションに最適化されたミニマムデザインになっている。それらのハードウェアデザインの違いとそれに起因するサービスの違いがどのように社会に受容されていくのかは、今後も注目である。これらのプラットフォームは、それぞれに開発環境を提供するとともに、ロボット用アプリケーション・ストアを開設し、新規開発者の参入障壁を下げ、また独自のマーケットを開拓する可能性を秘めていると言え、2015 年以降、本格的なロボットアプリビジネスが広がる可能性がある。研究機関におけるプラットフォームとしては、認知発達ロボティクス用ヒューマノイド icub は引き続き Italian Institute of Technology を中心に開発されており¹⁴⁾、研究開発ネットワークは EU 全域に広がり、日本では大阪大学を中心に共同研究が進んでいる。以前からロボット用ミドルウェアとして広く利用されてきた ROS (Robot Operating System) は 2013 年から Willow Garage 社から Open Source Robotics Foundation に管理が移管している¹⁵⁾。

・ 欧米での HRI 関連フェンド

EU は Horizon2020 のもと、180 の企業と研究機関が集結して世界最大の民間のロボット

開発計画 SPARC を 2014 年に開始した¹⁰⁾。2020 年までに 6000 億ユーロ規模の市場と 24 万人の雇用創出を目指している。ロボットの主要な応用分野として、製造、ヘルスケア、ホームケア、農業、セキュリティー、環境、交通、エンターテインメントなどが挙げられてが、HRI 関連技術はほとんどの分野で重要な技術であり、本プロジェクトの中でも重要な位置を占めている。

・ 自然言語・対話処理技術と HRI 分野の接近

これまで別々に発展してきた自然言語・対話処理技術とロボット技術の今後より急速に接近し発展していくものと考えられる。Apple Siri¹⁶⁾に代表されるような音声を用いたパーソナルアシスタントシステムは本格的な事業化が進んでいる（Microsoft Cortana¹⁷⁾、Google Now¹⁸⁾他）。米 IBM が 2011 年に発表した質問応答システム Watson は、ニューヨークに専用の拠点を設置し本格ビジネス化の段階に入っており、他業種との連携が始まっている。Softbank は、Pepper 用に Watson の日本語対応版を 2015 年にも事業展開すると発表した。学术界ではこれらに先立って 2010 年に AAI（米国人工知能学会）にて「Dialog with Robots」と称したシンポジウムが開催され¹⁹⁾、Microsoft Research や ATR、カーネギーメロン大学などの研究者が中心となり双方の分野の研究者が介し、ロボットと対話するための研究の方向性が議論され、各所で融合的な研究が進んでいる。

・ 高性能センサーデバイスの普及

人間とロボットのインタラクションではマルチモーダルな情報を処理しなければならないが、Microsoft Kinect（ジェスチャー認識）²⁰⁾や、Leap Motion（指先のジェスチャー）²¹⁾、EyeX（視線認識）²²⁾などの廉価な認識デバイスの登場以来、ユーザーの位置推定、姿勢認識（身体方向、姿勢）、ハンドジェスチャー認識、顔画像処理、顔表情認識、顔向き認識、視線認識などの視覚的情報が比較的取得しやすくなってきている。また、聴覚的情報については、実環境下での音声認識を実現するために音源定位や音源分離などの技術が極めて重要になるが、これについてはホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン、京都大学、東京工業大学などが中心になって開発したロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK が 2010 年より公開されており²³⁾、現在も活発に更新されている。HARK は ROS 等のロボットミドルウェアとの親和性も高く、Kinect 等の市販のデバイスにも標準対応しているため、世界各国のロボット研究者に利用されている。

（6）キーワード

言語・非言語的インタラクション、クラウド・ロボティクス、インタラクションの評価手法、ロボットの社会的受用、エンターテインメントロボット、高齢者支援ロボット、学習支援ロボット

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ ATR²⁴⁾や大阪大学を始めとして、HRI学会でのプレゼンスが非常に大きい（HRI学会での日本人の口頭発表件数は全体の16%を占める）。日本からの発表の内およそ6割がATRからの研究が占めており、この分野で大きな存在感を持っており、国際的な共同研究の拠点にもなっている。 ・ 早稲田大学は、ロボットを用いた会話プロトコル研究の草分け的存在であり、会話ファシリテーション等、先進的な研究を行っている⁶⁾。
	応用研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実用化を見据えた公共スペースでのロボットの運用に関する研究や高齢者支援、教育目的の研究が多く行われている。 ・ ATR知能ロボティクス研究所では、ショッピングモールのような人が行き交う公共空間において、環境に埋め込まれたセンサーネットワーク等も用いながら（街角環境理解技術）、ロボットが人間を案内したり神話的に話しかけたりするためのインタラクション技術の研究を行っている（街角環境調和型のインタラクション技術）。
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ SoftbankがパーソナルロボットPepper¹¹⁾を発表、IBMと共同でWatsonの日本語化を進め、Pepperのための対話に利用することが発表された。また、吉本興業はPepperなどのためのロボット・コンテンツ企画・開発会社「よしもとロボット研究所」²⁵⁾の設立を発表した。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ HRI学会での米国からの口頭発表件数は全体の57%を占める。もともとHRI研究に活発だったカーネギーメロン大学²⁶⁾やMIT²⁷⁾で訓練を受けた若手研究者がウィスコンシン大学マディソン校²⁸⁾やジョージア工科大学²⁹⁾などに移り研究室を開いて活発に研究を行っている。産業界からはWillow Garage（ロボット用ミドルウェアROSの開発元）社、また米国海軍系の研究所（Naval Research Laboratory）³⁰⁾などからも継続的に研究発表がされている。
	応用研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ 教育（子供とロボット）に関する研究や、テレプレゼンス・ロボットのインターフェースに関する研究が行われている。 ・ 軍事用の捜索・探索ロボットの操作を簡便にするためのインターフェースの研究なども行われている。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・ MIT Media LabからスピンアウトしたスタートアップJibo社がパーソナルロボットJiboを発表した（クラウドファンディングで開発費を調達した）¹³⁾。実際に発売されるのは2015年後半以降の予定だが、発売前から予約が殺到していることから、パーソナルロボットへの期待の大きさが伺える。 ・ パーソナルアシスタントエージェント Apple Siri¹⁶⁾、Microsoft Cortana¹⁷⁾、Google Now¹⁸⁾は社会に定着してきたといえ、高度な質問応答システムIBM Watsonも本格事業化され他業種との連携が図られ始めていることから、今後自然言語・対話技術とHRI分野との接近が進むものと考えられる。 ・ テレプレゼンス・ロボットは、Double Robotics社のDoubles³¹⁾、Suitable Technologies社のBeam³²⁾、またiRobot社のAva500³³⁾など、次々と発売され人気を博している。2012年の報告には、600万人以上の米国人が自宅で仕事を行っている^{とあり}、テレプレゼンス・ロボットのニーズは極めて大きいと考えられる。

欧州	基礎研究	◎	➔	<ul style="list-style-type: none"> ・ HRI学会でのEUからの口頭発表件数は米国に次いで全体の20%を占める。ドイツのビーレフェルト大学のCITEC（Center of Excellence Cognitive Interaction Technology）³⁴⁾、ポルトガルのINESC³⁵⁾などの活躍が目立つ。 ・ Horizon2020が2014年より本格開始。HRI関連分野への支援も進むものと考えられる。 ・ ヒューマノイド型認知発達ロボット・プラットフォームcubは、イタリア工科大学を中心に開発が続けられており¹⁴⁾、現在EU各国で各認知モジュールの開発やHRI研究が進められている。特に、外界とのインタラクションを通じた言語や道具の獲得、安全な制御等に関する基礎研究が目立つ。 ・ クラウド・ロボティクスの代表例として、EUのファンドで支援されているRobert⁹⁾が2009年から継続されており、2014年には複数のロボット間で現実世界の知識が共有・利用されるデモが公開された。これらの知識が増えていくことで、高齢者や身体障害者の支援も可能になると期待される。
	応用研究	○	➔	<ul style="list-style-type: none"> ・ 教育や高齢者支援のための研究が散見される。 ・ 英エディンバラ大学を中心にした国際的共同研究プロジェクトJAMES（Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems）⁸⁾では、ロボットに複数の人間を相手にするパートナーの役を担わせている
	産業化	○	➔	<ul style="list-style-type: none"> ・ Aldebaran Robotics（仏）が先行するNao、Romeoに続いてソフトバンクと共同でPepperを開発。多くの研究機関での利用が進んでいる³³⁾。今後、従来のHRI分野以外からの参入も増え、ロボットのアプリケーション開発が盛んになっていくものと考えられる。 ・ Horizon2020のもと、180の企業と研究機関が集結して世界最大の民間のロボット開発計画SPARCを2014年に開始し⁷⁾、2020年までに産業化を加速し6000億ユーロ規模の市場と24万人の雇用創出を目指している。このプログラムの中で、ロボットのアプリケーションとしてHuman-Robot Interactionも重要な位置を占めており、人間の内的状態も加味したインタラクションの実現を目指すとしている。
中国	基礎研究	×		<ul style="list-style-type: none"> ・ HRI関連学会でのアクティビティは非常に低い。
	応用研究	×		特になし
	産業化	×		特になし
韓国	基礎研究	△		<ul style="list-style-type: none"> ・ HRI関連学会でのアクティビティはかなり低い。
	応用研究	×		特になし
	産業化	×		特になし

(8) 引用資料

- 1) Human-Robot Interaction <http://humanrobotinteraction.org/>
- 2) ICSR (International Conference on Social Robotics) <http://icsr2014.org/>
- 3) ACM ICMI (International Conference on Multimodal Interaction) <http://icmi.acm.org/>
- 4) IVA (International Conference on Virtual Agents) <http://www.ccs.neu.edu/iva2014/>
- 5) SIGDIAL (Special Interest Group on Discourse and Dialogue of the Association for Computational Linguistics) <http://www.sigdial.org/>

- 6) 早稲田大学知覚情報システム研究室 <http://www.pcl.cs.waseda.ac.jp/>
- 7) Microsoft Research Situated Interaction Project
<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/dbohus/index.html>
- 8) JAMES (Joint Action for Multimodal Embodied Social Systems
<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rpetrick/projects/james/>
- 9) RoboEarth <http://roboearth.org/>
- 10) SPARK <http://sparc-robotics.eu/>
- 11) Softbank Pepper <http://www.softbank.jp/robot/special/pepper/>
- 12) Aldebaran Robotics (Nao, Romeo, Pepper) <http://www.aldebaran.com/>
- 13) Jibo <https://www.myjibo.com/>
- 14) iCub <http://www.iit.it/en/research/departments/icub-facility.html>
- 15) ROS (Robot Operating System) <http://www.ros.org/>
- 16) Apple Siri <https://www.apple.com/ios/siri/>
- 17) Microsoft Cortana
<http://www.windowsphone.com/en-us/how-to/wp8/cortana/meet-cortana>
- 18) Google Now <http://www.google.com/landing/now/>
- 19) AAI 2010 Fall Symposium “Dialog with Robots” <http://hci.cs.wisc.edu/aaai10/>
- 20) Microsoft Kinect <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- 21) Leap Motion <https://www.leapmotion.com/>
- 22) Tobi EyeX <http://www.tobii.com/eye-experience/>
- 23) ロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK <http://www.hark.jp/>
- 24) ATR 知能ロボティクス研究所 <http://www.irc.atr.jp/>
- 25) よしもとロボット研究所 <http://www.yoshimoto.co.jp/yrl/>
- 26) CMU Human-Computer Interaction Institute, Robotics Institute
<http://www.hcii.cmu.edu/> <https://www.ri.cmu.edu/>
- 27) MIT Media Lab Personal Robots Group <http://robotic.media.mit.edu/>
- 28) ウィスコンシン大学マディソン校 Human-Computer Interaction Group
<http://hci.cs.wisc.edu/>
- 29) ジョージア工科大学 Socially Intelligence Machine Lab
<http://www.cc.gatech.edu/social-machines/>
- 30) Naval Research Laboratory Intelligent Systems Section
<http://www.nrl.navy.mil/itd/aic/IntelligentSystems>
- 31) Double Robotics <http://www.doublerobotics.com/>
- 32) BeamPro <https://www.suitabletech.com/beam/>
- 33) iRobot Ava500 <http://www.irobot.com/For-Business/Ava-500>
- 34) ビーレフェルト大学 CITEC (ドイツ) <https://www.cit-ec.de/>
- 35) INESC-ID (ポルトガル) <http://www.inesc-id.pt/>

3.9.6 グラフィックス・ファブリケーション

(1) 研究開発領域名

グラフィックス・ファブリケーション

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

画像や映像といった視覚的情報、図形や3次元(3D)データといった形状情報などを扱う研究開発領域。画像処理や画像認識などと異なり、主に生成(synthesis)を対象とする。グラフィックスとしては主にディスプレイなどによって光学的に出力する情報を、ファブリケーションとしては3次元プリンターなどによって物理的に出力する情報を対象とする。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

計算機を用いた映像表現や形状処理は、現代社会においてなくてはならない技術の一つである。テレビや映画、ゲームといった動的なメディアにとどまらず、印刷物やポスターといったすべての画像情報が今日では計算機を用いて生成されている。また、医療・科学計算におけるデータの可視化などを通じて、医学や科学の発展に必要な不可欠な技術となっている。さらに、計算機を用いた形状処理技術は、いわゆるCAD(Computer-Aided Design)と呼ばれる技術であり、家電製品や衣服から車や建築物にいたる工業製品の設計に利用されている。

研究領域としてのグラフィックスは、米国計算機学会(ACM)のSIGGRAPHを中心として発展を続けている。1970年代から1980年代における研究の目標は3次元グラフィックスによる実写と区別できないリアルな映像の生成であったが、その目的は1990年代には一定の成功をおさめ、現在では、実写映画の中にコンピューターグラフィックスが普通に使われるようになってきている。そのような状況のもと、3次元グラフィックスの研究開発の主眼は、より物理的に正しい映像の生成、より多様な現象をより高速に(リアルタイムに)生成する技術、などへと移ってきている。また、3次元グラフィックス以外にも、画像処理や入出力デバイスに関する研究も広く行われている。

従来型のCAD技術はすでに完成された技術として認識されており、道具としては広く利用されているものの、新たな研究開発は活発とはいえない。自動車をはじめとする製造業における関心事は、さまざまな部署間におけるデータ共有を推進するPDM(Product Data Management)や、工場のライン計画やロボット配置などを行うCAPE(Computer Aided Process Engineering)に移ってきている。残されている課題としては、スタイルデザインには依然として2次元のドローイングが使われており、3次元的なデザインシステムや後工程のCAM(Computer-Aided Manufacturing)との連携が求められている。

一方、ファブリケーションと呼ばれる領域は、3次元プリンターをはじめとするラピッドプロトタイプング機器の普及を背景として最近活発に研究開発が行われているものであり、計算機の中にある情報を物理的な形状として出力することを対象とした形状生成・処理技術を扱うものである。従来の一般的なCADやCAMが伝統的な製造業における専門家の間の分業を前提としていたのに対し、多様なユーザーがユーザー技術を目指している点に特徴があるといえる。

最後に、形状処理技術における大きな技術的進展として、3Dスキャナー(3次元形状計測装置)の高度化と普及が挙げられる。工業製品や人体などを精密にスキャンする技術が近

年急速に発展して実用化が進んでいる他、Microsoft の Kinect に見られるようなリアルタイムで 3 次元形状を取得する技術も出てきている。産業分野では、足形をスキャンして個人に最適化した衣服や靴などをデザインするサービスや、来場者の顔をスキャンしてフィギュアを制作するサービスなどが実用化されている。

（４）科学技術的・政策的課題

グラフィックスおよびファブ리케이션に関わる技術は、我々の生活の利便性快適性を向上するために非常に重要であり、またコンテンツ産業やモノづくりといった我が国の産業の根幹を支える技術でもある。これらの技術を発展させていくことは、科学技術的な観点からも産業的な観点からも非常に重要と考えられる。

より魅力的な映像コンテンツをより効率よく生成するための技術

映像表現の質の向上に伴い、映像コンテンツの制作の人的コストが上昇を続けており、製作者側にとって大きな負担となっている。この問題を解決するために、高度な映像コンテンツを低コストで効率よく生成するための技術が求められている。具体的には、スキャンングによって実際の環境を取り込む技術や、過去の資産を効率よく蓄積して再利用する技術、トレーニングを受けていないユーザーでもコンテンツ生成を行えるようにするインタラクション技術などが重要である。特に米国に比べ日本の映像制作は低予算で行われることが多く、低コスト化は競争力の維持のために必須である。

また、日本のアニメに見られる非写実的な表現においては、現実の光の反射や屈折を正確に再現する事を目的とした光伝搬シミュレーションによる計算でなく、従来型のアーティスト主導の制作が行われているのが現状である。しかし、このようなアーティスト主導の制作はコストがかかるため、非写実的な映像においても計算による制作支援は非常に有効であると考えられ、この方向での技術開発が求められる。

カメラからの実写との合成のための技術の研究

レンダリング技術は、本質的には光のシミュレーションである。そのため、カメラやその他光学機器から得られる画像と CG とは、計算機上のデータか現実の物体かの違いはあるが、光の伝搬による結果を見ているという事は変わらない。この特性を踏まえると、実写に対する CG の合成による情報の付加（Argumented Reality、AR）において、非常に自然なアプローチであると考えられる。近年では、安価な HMD（ヘッドマウントディスプレイ）や、3次元形状計測器（Microsoft の Kinect など）が普及し始めており、それらとレンダリングにおける研究成果を組み合わせる事によって、従来の AR の研究では得られなかった、自然な情報の付加が可能になると考えられる。これは、日本の光学機器の強い国際競争力を生かす事ができる研究テーマである。

多様なニーズに対応したものづくりのためのデザイン・ファブ리케이션技術

個人の価値観や生活スタイルの多様化が進んでおり、これらに対応したロングテールなものづくりが求められている。また、少子高齢化の進展により、体の不自由な人が今後増えていくことが予想され、これらの人々の生活を支えるための技術が求められている。特に、

個人々の持つハンディはすべてバラバラであるため、個別対応が必要である。また、介護のような福祉の現場においても、容易にカスタマイズ可能な介助補助器具へのニーズは非常に高い。このような多様化したニーズに応えることは、同じデザインを大量に生産する従来の工業生産のモデルでは対応できない問題であり、近年発展しているインタラクティブなデザイン技術やファブリケーション技術を活用した解決が期待される。

国内における産業界との結びつきの強化

本領域における、日本での産業界と学術界の結びつきは非常に弱い。コンテンツ産業の国際的な展開に比べ、国内における CG 制作ソフトウェアや CAD ソフトウェアは欧米のソフトウェア会社のものが主流である。その背景には、そもそも日本の産業界に高度な技術を持った人材が定着していないという問題がある。米国の Pixar や AutoDesk をはじめ、国内のそういった人材は海外に流出している。また、米国の NVIDIA、Microsoft などの奨学金プログラムやインターンシップなどによる、学術界と産業界の連携がまったく行われておらず、学生の就職先としての日本の CG や CAD 業界の魅力は非常に低いと言わざるを得ない状況にある。そのような状況を改善する一歩として、既存のコンテンツ産業や製造業の強みを生かし、しっかりとした産学連携による研究所の共同設立を行い、国内のみに限らず、海外からも優秀な人材を呼び込める研究環境づくりが重要であると思われる。

関連研究分野との学術的・技術的交流の促進

グラフィックスやファブリケーションは本質的に学際的な研究分野であり、例えばレンダリングにおいては、計算機科学を中心として、計算統計、宇宙物理、解析学、認知科学などとの深い関連が度々指摘されて来ている。例えば雲や煙などの不定形の物体のレンダリングについて、放射性粒子の伝搬シミュレーションとの関連が指摘されている。また、衣服のシミュレーション技術は服飾産業や織物産業に役立つものであり、都市や建物のモデリングは実際の都市計画や建築設計や災害対策などに応用可能である。しかしながら、これらの分野間の成果や研究者同士の交流は限定的であり、他分野で既知の技術が再発見される事も起きている。このような現状を踏まえ、グラフィックス・ファブリケーションの研究者が他分野の学会で講演を行うなどの活動も始まっているが、もっと本質的な学術交流が必要である。これは、研究成果の応用領域を広げるためにも重要であり、どのような応用が存在するかについて分野を超えた議論が求められる。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・2008 年ごろから光の物理に基づいたレンダリング技術が盛んになってきており、学術的にも産業的にも注目を集めている。例えば人間の肌や大理石など、半透明の物体の反射特性についての研究が、宇宙物理や計算統計・信号処理における理論の応用によって大きく進み、有機的な物体が非常に写実的にレンダリングできるようになった。学術分野では、フォトンマッピング法を開発した UCSD のグループなどが有名である。産業分野では、映画での応用が著しく、デジタルダブルとよばれる、俳優やスタントマンを CG によって完全に置き換える技術がハリウッドで使われ始めている。
- ・さまざまな入力データに対して「破綻」しないような光の伝搬シミュレーションについて

の研究が大きく注目を集めており、計算統計や応用数学の知識を組み合わせた学際的な研究の競争が起こっている。比較的新しい研究成果が米国の **Pixar** など実際に利用されるなど、産業界全体として、新たな研究成果をいち早く導入する競争が激化している。

- 並列計算プラットフォームを用いた高速並列計算は円熟期にあり、産業的応用が著しい。特に米国において、GPU メーカー各社 (**NVIDIA**、**Intel**、**AMD**) が、レイトレーシングと呼ばれるレンダリングの基盤技術についての基本ソフトウェアを提供しており、市場での競争が激化している。
- **CG** 技術と **3D** プリンターを組み合わせた次世代のモノづくりに関する研究が、近年加速してきている。例えば **3D** プリント結果に特定の力学的特性を持たせるもの、少ない素材で高い強度を実現するもの、対象を **3D** プリントしやすい形に加工するもの、などさまざまな研究がある。インタラクティブなデザインと物理シミュレーションを統合するモノづくりの研究も注目されており、衣服・家具・バルーン・紙飛行機等のさまざまな対象についての研究がある。
- ファブリケーションのもう一つの側面として、特定の見え方を持つモノを作り出すという研究もある。例えば物体表面に複雑な反射特性を持たせるものや、アクリル板を通る光の屈折によって複雑な画像を描き出すもの等が研究されている。
- **3** 次元形状の計測技術も近年著しく進展しており、現在では人の顔の微細な皺（しわ）や眉毛等をも計測することが可能となっている。こういった技術の用途は **CG** 制作だけにとどまるものではなく、例えば **3D** プリンターと組み合わせることで、被写体のフィギュア人形を作ることが可能になってきている。また **Microsoft Kinect** に代表される深度カメラを用いたリアルタイムな形状計測に関する研究も盛んであり、特に仮想空間または遠距離コミュニケーションへの応用が期待されている。**Intel** は最近ノート PC に内蔵できるほど小さい深度カメラ **RealSense** を発表しており²⁾、この分野が今後ますます発展することが予想される。
- グラフィックス技術を建築分野に応用する研究も最近注目を集めている。例えば有機的な形をしたビルの壁面をガラスのパネルで構成したい場合に、最適なパネルの配置を決める方法が研究されており、それを実際の建築プロジェクトに適用する試みもある³⁾。もう一つのトピックとして、石造りのアーチのような、ブロック同士が重力のみで支え合うような構造を求める研究もあり、低コストで頑健な建築の新しいアプローチとして、大いに期待されている。ウィーン工科大学の **Helmut Pottmann** 教授がこの分野の第一人者として有名である。
- カメラと計算機の高性能化に伴い、**Computational Photography** と呼ばれる新しい写真撮影法に関する分野が、ここ数年で急速に発展している⁴⁾。例えばフォーカスを撮影後に変えたり、ピンぼけや手ブレを修正したり、暗所でフラッシュを用いないで撮影したり、といったことが可能になっており、一部の技術は既に商業化され、広く使われている⁵⁾。**CG** 以外の産業や医療への応用を目指した研究として、数メートル以上離れた場所からでも読み取れるバーコードや、白内障を始めとする目の病気の診断を低コストで行えるようにする方法といったものもある。
- 新しい入出力の方法も **CG** 分野のトピックの一つである。カメラで手の動きを撮影しその姿勢と形をリアルタイムに計算することで **3** 次元的な入力を可能にする **MIT** の研究は、

その後ベンチャー事業として商用化されている⁶⁾。また、3D キャラクターの姿勢を自在に操るための、実際に手で触って動かせる入力装置も最近提案された。出力方法に関しても、回転する鏡によって3D映像（ホログラム）を表示する装置や、落下する水滴にプロジェクタから映像を投影するディスプレイ装置、空中に浮遊する紛体を制御するものなど、斬新で実験的な研究が多くなされている。

- ・クラウド技術の進展に伴い、多数のユーザーが生み出した大量のデータを活用する研究が増えている。例えば既に存在する大量の3Dモデル群に対し機械学習を行うことで、ユーザーが新しい3Dモデルを制作する過程を手助けする手法、大量のスケッチ画像を利用してユーザーが新しいスケッチを描くのを手助けする手法、観光地等で多数のユーザーが撮影した大量の写真から3次元空間を再構築する手法、等が研究されている。

（6）キーワード

物理ベースレンダリング、光の伝搬シミュレーション、3Dプリンター、3次元計測、深度カメラ、Computational Photography、情報可視化、3D（ステレオ）ディスプレイ、クラウドコンピューティング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・1980~1990年代にはラジオシティ法を始めとするCGの基盤的な技術の研究が盛んだったが、その後CGの範疇がより多様化し、使われる技術が高度化するにつれ、新しい領域を作り出すような画期的な基礎研究はあまり見られなくなってきている。 ・SIGGRAPHでの発表はほぼ東京大学からのみであり、中国と比べると研究者の層が非常に薄い。また、コンテンツ産業の台頭に比べて、CGの基盤の技術の研究は非常に弱く、日本の国際学会におけるプレゼンスは非常に小さい。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本で特に盛んに研究されているトピックとしては、マンガ風などの非写実的描画、自然現象のシミュレーション、デザインのためのユーザーインターフェース、顔のモデリング、3次元形状検索、等がある。 ・Microsoft Research Asiaなどのような、学術界への貢献が顕著な企業の研究所も存在せず、学生や研究者の就職先としても、大学との共同研究先としても、市場規模はかなり小さい。産業と研究両面からの支援が望まれる。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・国内の映像制作において高度なCG技術をふんだんに使うケースは少ない。例えばスタジオジブリでは基本的に全てを手描きで制作している。NHKには比較的大きなCGチームがあり、ニュースの解説映像や大河ドラマなどでCGを積極的に利用している。OLMデジタルはCGによる映画制作で有名であり、学術的な研究もある程度行っている。 ・任天堂を始めとする日本のゲーム産業は伝統的に世界をリードしてきたが、CG表現の重要性が高まった昨今は、CG技術に関して欧米メーカーに後れを取っている。スクウェア・エニックスはCGに力を入れており、学術的な研究もある程度行っている。 ・一般にCG関連の企業における学術的な研究の比重は小さく、産業界と学術界の連携は弱い。学生が国内企業でのインターンでCG分野の研究をして学位を取るケースはほとんど無い。

北米	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> MITやStanfordを始めとする名門校が、CG分野の黎明期から基礎研究で世界をリードしてきており、ブレイクスルーとなる画期的な研究を今も生み出し続けている。 大学における研究は、産業界とのつながりが強い。企業と共同で実用性に重きを置いた研究を行うことが多い他、大学発の研究をもとにベンチャー企業を立ち上げるケースも多い。 研究予算は主要な大学（Cornell University、University of California、MIT、Stanford）などに集中しており、他大学では研究予算の取得が以前に比べると困難になっている。これは、企業における研究が盛んになってきたためであり、著名な研究者が企業の研究者に移籍する例も多い。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> Microsoftにはコンピューター科学の大規模な研究所があり、その中に強力なCGのグループがある。Windows OSに将来的に役立つ可能性のある画像・動画処理等に関する技術や、自社製品のKinectを用いた技術等の研究が多いが、製品化には必ずしも直結しないような基礎研究も多い。 Intelは、並列計算ハードウェアを用いたレンダリングの高速化の研究を盛んに行っている。メニーコアCPUの主な応用領域の一つとして、レイトレーシングを推進しており、産学連携も非常に盛ん。 AdobeはPhotoshopやIllustratorに代表されるグラフィックデザインソフトの会社だが、それらに搭載する新機能の開発を目指して、画像・動画処理等に関する研究を精力的に行っている。一方で3Dモデルの分析・可視化など、実験的な性質の基礎研究も行っている。 GPUメーカーのNVIDIAは、ハードウェアの開発と並行して、その性能をうまく引き出すためのソフトウェアに関する研究を行っている。CGの中でもレンダリングやシミュレーションなど計算コストの高いトピックに関する研究が多い。またGPUをCG以外の目的に利用するGPGPUという技術は、医学や金融など高度な計算が必要とされる専門分野で広く利用されている。 AutodeskはMayaとAutoCADというCGとCADの両分野でそれぞれ非常に有名なデザインソフトの会社であり、それに関する基盤的技術（レンダリングやシミュレーション）やユーザーインターフェースの研究開発を行っている。 Disneyは多数の子会社を擁する巨大グループだが、映画制作・遊園地・テレビ局など多くのセクターでCG技術を必要としているので、CG専門の研究所を設立し、精力的に研究を行っている。またPixarを始めとするDisney傘下の映画会社も、それぞれ中規模の研究グループを有する。 NVIDIA、Intel、Microsoft Researchなどの大企業は学生向けの奨学金制度（年間350万円ほど）を持っており、コンピューターグラフィックスに関わる学生のインターンシッププログラムも非常に活発である。インターンシップは、通常数ヶ月のスパンで研究開発を行い、研究成果を学術論文として発表することが多い。インターンシップを経由後、その後企業に就職する例も非常に多く、産業と大学の結びつきが非常に強い。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ハリウッドをはじめとし、米国は依然として世界的にみて映画産業の中心であり、そこで多数のCG技術（スペシャルエフェクト）が使われ、高度な技術を持った研究者・学生の就業先として最大の市場を持っている。ゲーム産業も世界をリードする立場にあり、多くの最新のCG技術が投入されている。 AdobeやAutodeskに代表されるCG制作作用ソフトも世界的なシェアを抑えているのは北米の企業である。 3Dプリンターを利用したビジネスも盛んになってきており、オンラインで3Dプリントを発注したり、形状データを売買したりするネットサービスなどがでてきている。（shapeways、ponokoなど）
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツのMPI、フランスのINRIAなど、伝統のある国立の研究所で、外部の大学から学生を受け入れて指導し、多くの基礎研究を行っている。 大学における研究はヨーロッパ各国に、中心となる研究者とともに分散している傾向にある。米国に比べると、研究予算の規模は少ないが（EUのプロジェクトを除く）研究費獲得が容易な傾向がある。特にINRIAはフランスの国営研究所として、コンピューターグラフィックスにおいても一定のプレゼンスを保っている。北米に比べると、応用がやや弱い分、学術的な基礎研究では台頭し始めている。

欧州	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 英国のMicrosoft Research Cambridgeは、CGとコンピュータービジョンの研究で有名である。Kinectはここで開発されたものであり、現在もKinectを用いた研究で世界をリードしている。 米国に比べると小規模ではあるが、IntelやNVIDIAと大学の共同運営が行われている研究所が存在する。MPIとLund Universityは両者ともIntelとの共同研究グループを持ち、特に前者については、Stanford Universityとの研究協定も持っている。 Disney ResearchのZurich研究所は、レンダリングに限らずコンピューターグラフィックス全般の研究において非常に活発であり、ETH Zurichとの産学連携も含めて、成功を取めているといえる。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 映画スタジオ（Double Negative）やゲーム会社（Unity、Crytek）などでCGの利用が盛んであり、北米に次ぐ市場として国際的に注目を集めつつある。 世界最大の家具メーカーであるIKEAはCGを多用しており、カタログ写真の大部分はCGで制作されている。 ドイツでは自動車産業におけるCG利用（設計や宣伝）が多い。
中東	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> イスラエルの複数の大学で、盛んに研究が行われている。特に高度な数学的素養が必要とされる形状処理に関する基礎研究で有名。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> サウジアラビアのKAUSTでは、最近巨大な予算を投じてCGの研究グループが設立された。特に建築とCGの融合に関する研究で有名。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> イスラエルを中心に、最先端の技術を産業化するベンチャー企業が多数生まれている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> Zhejiang UniversityやUnivesrity of Hong Kongなど、米国で研究者として確立した後に、母国に戻るケースが見られ、特に中国からの研究発表は非常に盛んになってきている。 ただ、どちらかという、基礎研究に対する比重は小さく、欧米のトレンドに追従する研究も目に付く。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 北京のMicrosoft Research Asiaは、清華大・浙江大など中国の名門大学から大量にインターンの学生を雇い、大人数のチームで研究を行っている。特にGPUをフル活用した、リアルタイム計算（レンダリングやシミュレーション）の研究が多い。 香港の存在感が大きい。複数の有名校から、多数の良質な論文が出ている。また、浙江大学には大規模なグラフィックスとCADの研究所がある。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 映画やゲームといったコンテンツ産業が成長してきている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 特にキャラクターアニメーションに関する研究が活発である。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国型のような研究を活発に行う企業は見られない。 サムソンがCGを含むコンピューター科学全般の研究に対するファンディングを行っている⁷⁾。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> オンラインゲームや映画やドラマといった映像作品が海外にも輸出されている。国としても振興に力を入れている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Bickel, Computational Aspects of Fabrication: Modeling, Design, and 3D Printing, CGF, 2013
- 2) RealSense: <http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-depth-technologies.html>
- 3) Schiftner, Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions, AAG, 2012
- 4) Computational Photography Comes into Focus, CACM, 2014
- 5) <https://www.lytro.com/>
- 6) <http://www.threegear.com/>
- 7) The SAMSUNG Global Research Outreach (GRO) Program
http://www.sait.samsung.co.kr/saithome/Page.do?method=main&pagePath=01_about/&pageName=ag_going