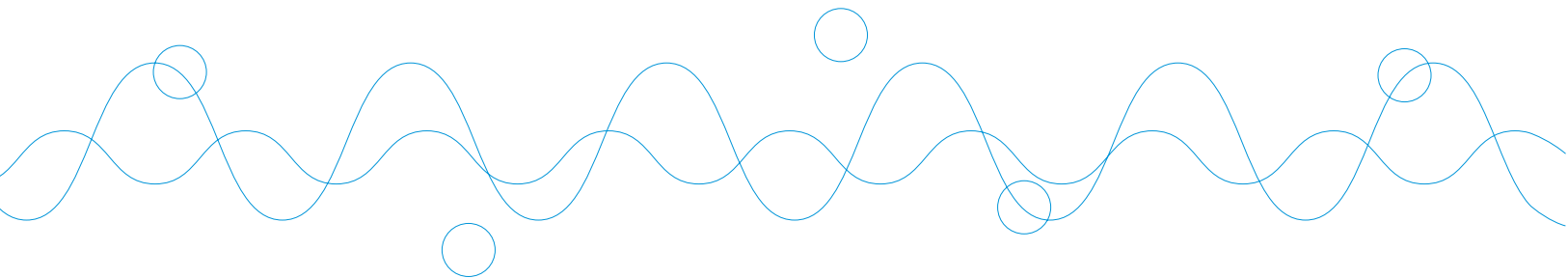


ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA CCTAACT CTCAGACC

戦略プログラム
脳情報双方向活用技術

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



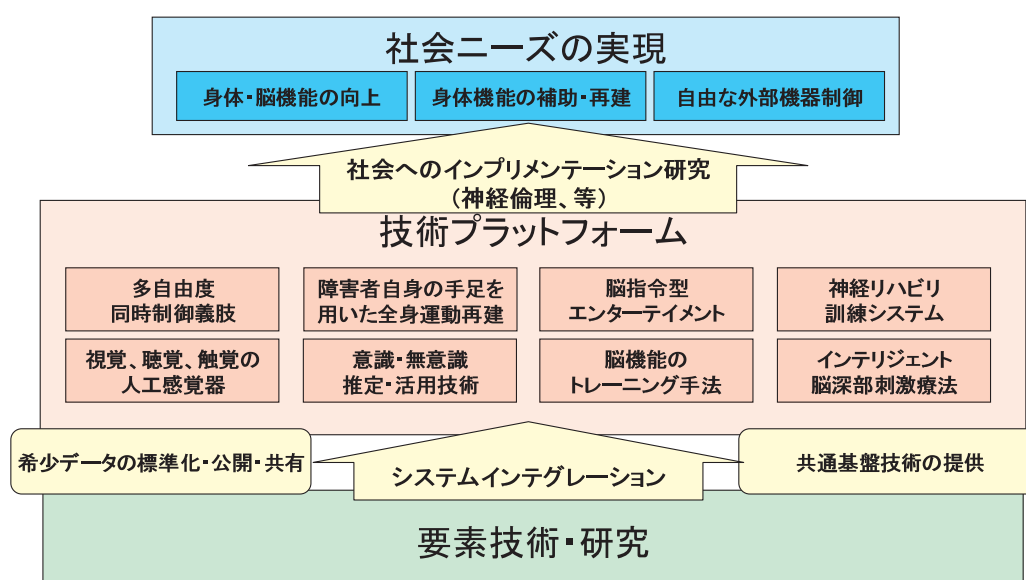
エグゼクティブサマリー

脳情報双方向活用技術（interactive brain information technology: IBIT）とは、脳の活動に伴う信号を外部に出力し、外界の情報を脳に入力するといった双方向の情報のやり取りにより、外部機器操作や人工感覚を実現する技術である。この技術には、情報のフィードバックによる脳機能の向上も含まれる。

他人とコミュニケーションをとったり機器の操作をするということは、声を出したり、文字を書いたり、ボタンを押したり、あるいはブザー音を聞いたり、モニターを眺めたりと、身体を通した運動や感覚を伴い実現している。これらに加えて脳情報双方向活用技術では、身体を介さずに脳と外界で情報をやりとりする技術を開発する。その実現には、1) 脳からの信号の検出、2) 信号からの情報の解析、3) 抽出情報による外部機器等の制御、4) 脳への情報のフィードバック技術、5) 脳の可塑的变化、という要素技術を確認し、それらを統合した技術が開発されなければならない。本戦略プログラムでは、こうした要素技術開発とその統合を実現する、技術プラットフォームを提案する。



「脳情報双方向活用技術」推進の枠組み



プラットフォームにおける研究を加速するために、ヒトや霊長類の脳活動記録などの希少データを異なる研究グループで共有し、開発したデバイスやソフトウェアなども相互に利用し検証する。また、研究全体では、初期には個別に実施される侵襲型と非侵襲型の脳活動計測が時間次第に連携

をとる必要があることから、それらのデータのブリッジングを促すよう、計画段階から求めていく。

本提案により実現される技術は、障害により失われたヒトの機能を支援あるいは回復させたり、通常では実現できないような多自由度な運動や無意識にうちに判断されているような脳活動を利用する技術の基盤となるものである。従って、一つには障害を持つ方の活動を支援する技術として生活の質（QOL）の向上に資することが期待される。一方では、人が機器を操作する際の快適なインターフェースを提供し、また、これまで達成できなかったような複雑多様な作業が可能となり、生産性の向上につながるものと考えられる。また脳へのフィードバックによるリハビリテーションの促進や、技能習得のトレーニング効率を高める手法の開発にも貢献する基盤技術が得られるものと考えられる。

社会的なアウトカムのみではなく、本提案の研究開発を実施することにより脳機能解明における大きなブレイクスルーを提供する。脳の中で情報がどのように符号化されているのか、またそれをどのように活用しているのかという、脳の作動原理そのものに迫るものである。また、「こころ」の一側面を切り出す研究でもあるため、心理学、認知科学や哲学や芸術などの人文・社会科学の広範な学問領域に対して、これまでの内省などの主観とは異なる形で「こころ」のありようを表すすべを提供することになり、大きな影響を与えることが想定される。また運動生理学などの身体の制御に関わる研究領域にとっても、運動パターンの切り替えなど高次の情報処理機構を明らかにするツールともなり、その成果は自律的な運動制御機構を持つ人工物の創成など工学的な研究領域にも波及する。

本研究領域は非常に幅広い領域を包含する融合領域を形成することと、そこから応用研究や社会への技術の展開などで様々なアプリケーションとして、異なる開発フェーズが平行して進行することが想定される。こうした研究開発を有効に機能させるためには、全体をコーディネートする組織が重要である。基礎研究としてこの研究開発全体を見る組織としては、現状では文部科学省科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会及び学術分科会学術研究推進部会の下に設置された脳科学委員会が該当し、この委員会の下に長期的な運営が実施されることが適当であると考えられる。また、人間自身のあり方や社会的な影響の大きい技術の開発であり、研究手法に関わる倫理的な検討とともに、その技術が社会にどう受容されるのかについて、研究の実施とともに研究者以外も交えて検討を進めていくことに留意すべきである。

目 次

エグゼクティブサマリー

1 章 脳情報双方向活用技術（IBIT）とは	1
2 章 IBIT 研究に投資する意義	3
3 章 IBIT プラットフォームにおける具体的な研究開発課題	5
4 章 研究開発の推進方法	15
5 章 IBIT がもたらす科学技術上の効果	17
6 章 IBIT により期待される成果と社会・経済的効果	19
7 章 IBIT 研究開発の時間軸	22
8 章 検討の経緯	23
9 章 海外の状況	27

1 章 脳情報双方向活用技術（IBIT）とは

脳情報双方向活用技術（IBIT）とは、脳の活動に伴う信号を外部に出力し、外界の情報を脳に入力するといった双方向の情報のやり取りにより、外部機器操作や人工感覚を実現する技術である。この技術には、情報のフィードバックによる脳機能の向上も含まれる。

人間が他人や機器と情報をやりとりする際には、指でタイプライターをたたく、声帯を震わせて声を発する、目の網膜で光を受けて形を知るなど、身体を介して外界と脳との間で情報のやりとりを行っている。こうした身体を介した情報の間接的な伝達に加えて、「脳情報双方向活用技術」として、脳の活動に伴う信号を直接外部で利用可能な情報に変換し活用したり、外部からの情報を直接脳に入力して認識するといった、これまでにない人間と外界の双方向の情報伝達技術を創出するための基盤技術の開発を目指す。

脳情報双方向活用技術の実現には、脳と外界の相互作用に関わる多様な要素技術を集約することが必要である。そのため、本戦略プログラムでは、要素技術の獲得を個々の研究開発として推進するのではなく、最終的な統合技術レベルを想定した技術プラットフォームを複数設定し実施することを提案する（図 2）。

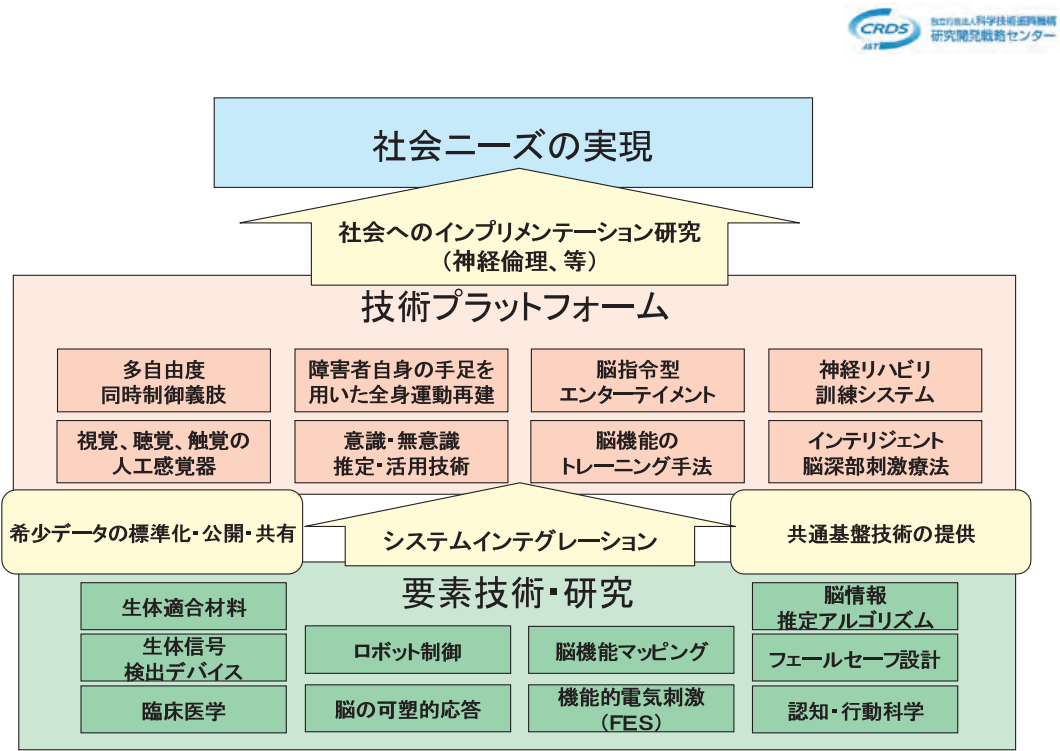


図 2

脳情報双方向活用技術
（IBIT）とは

IBIT 研究に投資
する意義

IBIT プラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBIT がもたらす
科学技術上の効果

IBIT により期待される
成果と社会・経済的效果

IBIT 研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

技術プラットフォームには、社会ニーズの充足を目指して 1) 多自由度同時制御義肢、2) 障害者自身の手足を用いた全身運動再建、3) 脳指令型エンターテインメント、4) 神経リハビリテーション・訓練システム、5) 視覚、聴覚、触覚の人工感覚器、6) 意識・無意識推定活用技術、7) 脳機能のトレーニング手法、8) インテリジェント脳深部刺激療法を設定する。

要素技術の集約を加速させるために、プラットフォーム内、及び、プラットフォーム間で、希少データ（霊長類やヒトの脳活動記録等）、共通基盤技術やリソース（開発したデバイスや機器、ソフトウェア、生体試料、等）の標準化や共有を推進する。要素技術開発と技術プラットフォームは横系と縦系の関係にあり、またそれぞれの進展には時間的なずれがあるため、本提案の実施には時系列的に全体を把握しながら横系と縦系を調整することが重要である。

脳情報双方向活用技術は外界をどのように受け取り、判断し、行動を起こすかといった究極的には人間の在りように深く関わることが想定される技術であり、その技術が社会に受け入れられるためにも、コンセンサスの形成とそれに即した研究開発が重要である。本研究提案においては、研究開発の過程で得られた情報や何を目指したものであるかを可能な限り社会に判る形で発信し、科学的データに基づく判断がなされるよう留意する。その際に必要となる安全性や脳機能に対する効果等に関する研究も本提案には含まれる。

2 章 IBIT 研究に投資する意義

脳情報双方向活用技術は、体が障害を受けることにより消失したり弱まった機能の回復とともに、本来備わっているヒトの体の構造や機能の特性により制限され活用できていない脳機能の活用も含む技術である。

本提案で対象とする、脳機能が障害により消失・減弱したり身体により制限されるとは、

1. 事故や疾病により身体の一部を失うことにより、運動機能や感覚機能を消失すること、
2. 麻痺により運動機能や感覚機能を十分に発揮できないこと、
3. 加齢や経歴、状況等により、個人毎に脳機能（身体調節能力も含む）に差が生じること、
4. 健常人であっても判断してから運動を起こすまでに遅れがあったり、自身が感じていることの一部しか表現できない等の制約があること、
5. 無意識に生じている脳内活動を意識的には活用出来ていないこと、等が相当する。

このような身体により制限されている人間の脳機能の利用範囲を拡大することは、健康・福祉の面からは脳梗塞による麻痺から身体機能を回復するリハビリテーションや脊髄損傷患者の歩行の実現、高齢化社会が進む中で要求が高まる認知機能を含む身体能力の補助など様々な面での貢献が期待される。また健常者に対しても、コンピュータの入力やロボット操作、危険回避やあいまいな状況での判断等、ヒトの脳機能が十分には発揮できていなかった様々な場面において、その能力を活かす技術の開発に大きく貢献するものと考えられる。また、このような研究開発の成果として、多自由度義手や二足歩行技術、ヒトの認知特性に関する知見など様々な要素技術が得られるが、こうした技術は脳からの信号を利用するものだけではなく、既存の手で操作する機器や他の生体信号を利用する機器などについても、その機能向上に資するものと考えられる。

さらに本提案による研究領域では、生物学的意味での脳機能の理解にとどまらず、意識や創造性といった人間の持つ高度な活動を脳機能の発現として理解する科学に結び付ける研究領域としてことに重要である。例えば人間は不合理な判断をしばしば行う。そこには脳内での無意識下の活動が関わっていると想定されているが、現状ではまだその仕組みについての知見や研究手法は限られており、本提案の成果がそういった高次の脳活動の理解に貢献するものと期待される。こうした研究領域は「我々は何者であるか」といった根源的な問いに迫るひとつの方法論を提供し、人文・社会科学も含めた幅広い科学の発展に大きな影響をもたらすものと考えられる。

近年、本提案に関連する研究開発では国際的に具体的な展開が急速に進められてきており、また、その成果も現れてきている。米国では、全身麻痺の患者の脳皮質に多電極を装着し、記録した神経細胞活動の信号を解析することにより、患者の意図したとおりにコンピュータのカーソルを操作する臨床試験が実施されている。また、同様の侵襲的な電極による神経活動記録を利用して、トレーニングした霊長類を用いたロボットアームの三次元制御実験も進められている。こうした先駆的な研究の結果、脳内での情報処理の原理自体はブラックボックスのままであっても、脳からの情報を基に意図したように外部機器を制御できることが実証されてきている。しかしながら可能性は示されているものの、現実の社会環境の中で使用できる自由度の高い制御を実現するためには、多くのブレイクスルーを必要としている。我が国でも、霊長類を用いた運動や判断に関する脳内情報表現に関する研究は、世界的にもトップレベルの成果を上げており、こうした基礎的成果を元に脳内情報に基づく外部機器制御に関する融合研究が精密機械工学等の他分野との連携により実施されているところであり、特に国際的にも優位性をもつロボット工学との連携が重要である。国際的な共同研究も活発となってきており、最近米国において多点電極によりサルの脳活動を記録した情報をインターネットにより日本に送信し、新たに開発した二足歩行ロボットのリアルタイムでの歩行実験に成功している。

侵襲性の高い刺入電極による脳機能計測とは別に、以前より研究開発が行われているヒトの脳波等の非侵襲型計測による外部機器制御技術の研究も進展している。通常この手法には被験者側のトレーニングが必要となるが、最近我が国に於いて、運動野の機能的磁気共鳴画像（fMRI）情報にもとづきトレーニングを伴わずに被験者の行動（グー、チョキ、パーのいずれを思い描いているか）を推定し、ロボットハンドを制御することに成功している。

脳情報双方向活用技術を支える個別の分野での我が国の優位性を活かし、それぞれの研究開発を束ねた技術プラットフォームを形成することは、システムインテグレーションで先行する米国に対して競争力を確保するためにも重要であるが、現状のままでは、我が国が有する個別に優れている要素技術が米国主導の技術プラットフォームに取り込まれてしまうという懸念が存在し、我が国独自の技術プラットフォームへの投資が求められるところである。

尚、本研究開発による成果はもとよりその過程で明らかになる脳に関する様々な知見は、社会的にも大きなインパクトを与える可能性があり、得られる技術や知見を適切に社会に伝えることにより、無用な混乱を小さくするための推進方策の実施が重要である。

3 章 IBIT プラットフォームにおける具体的な研究開発課題

IBIT プラットフォームでは競合的な要素技術の研究開発の推進とそれらを統合したシステムとしての IBIT 開発の横系と縦系の関連を研究開発の進展の時系列をふまえてコーディネートすることが重要である。

要素技術・研究課題としては、脳情報双方向活用技術を形成する脳と外界との情報伝達・活用に関わる以下の事象が対応する。

- 脳からの信号の検出
- 信号からの情報の解析
- 抽出情報による外部機器等の制御
- 脳への情報のフィードバック技術
- 脳の可塑的変化の適正化

脳からの信号の検出：

脳の活動を信号として検出する手法には、大きく分けて侵襲的なもの（侵襲型）と非侵襲的なもの（非侵襲型）があり、本提案では、目指すアウトカムに応じてどちらの手法を主たる手段とするかを選別すると共に、両者の研究成果を相互に活用できる枠組みを構築する。

侵襲型とは外科的手術を要するものであり、刺入電極を皮質内へ挿入するユニットレコーディングや皮質表面に置いた平板電極から皮質脳波（Electrocorticogram: ECoG）計測といった電氣的活動を計測するものや、近年は CMOS センサーを脳内に留置し光学計測や生体物質の濃度変化を検出するものなどが考案されてきている（コラム：CMOS センサー）。侵襲型の中でも刺入電極は傷害の程度が大きいのに対し、ECoG や CMOS センサーの留置は比較的侵襲性が低く、ここでは低侵襲型として区別して取り扱うこととする。一方、非侵襲型には脳波計測や fMRI や近赤外スペクトロスコーピー等の脳機能イメージング技術などが存在する。侵襲的な方式は時間・空間分解能が非侵襲的な手法に比べて良く、現状ではより精度の高い身体運動の推定を実現している。一方、非侵襲的な手法は侵襲的な手法よりも格段に安全性が高く、将来 IBIT が社会的に大きく取り入れられるためには不可欠な技術である。

侵襲型：マルチ電極を用いた電気記録

長所：時間・空間分解能に優れる、小型化や無線化が容易で可搬性に適する

短所：傷害や感染症の危険性、長期間の安定した記録が困難、広範囲の記録が困難

脳情報双方向活用技術
(IBIT) とは

IBIT 研究に投資
する意義

IBIT プラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBIT がもたらす
科学技術上の効果

IBIT により期待される
成果と社会・経済的效果

IBIT 研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

非侵襲型：頭蓋の外側から脳活動を計測

長所：傷害や感染症の危険性がない、広範囲の脳活動を記録可能

短所：時間・空間分解能に劣る、装置の小型化が困難で現状では可搬性に適さない、連続記録が困難

侵襲型の信号の検出技術開発としては、特に刺入電極を用いたユニットレコーディングによる詳細な検出と解析を実験動物（主にサル）を用いて実施し、ヒトでは皮質脳波計測による臨床研究が主体となる。ユニットレコーディングによる脳内活動計測は、従来からシングルユニットでの研究は我が国においても盛んに実施されてきたが、IBIT 実現に向けた研究では、単一の電極ではなく多重電極による計測が必要となる。電極による計測において最も解決すべき技術的な問題点は、長い期間にわたり安定して電氣的活動を記録できるようにすることである。このためには電極開発が必要不可欠であり、電極材料や MEMS を用いた微細加工などの研究開発と動物を用いた実証研究を実施する。

一方、低侵襲型計測としては皮質脳波計測（ECoG）と CMOS 技術が想定される。ECoG による臨床研究は、まずはてんかんや疼痛等の治療のために外科手術を行い脳内に電極を留置している方の協力を得て実施する。ECoG からの神経活動記録から、筋肉を動かすための運動指令が脳においてどのような神経活動として表現されているのかを明らかにする。ECoG はすでに我が国でも治療行為として現実にヒトで利用されているが、CMOS を用いた計測技術は現状ではまだ動物実験の段階であり、動物実験による安全性の評価と計測手法の開発を行う。特に光計測を中心に他の計測可能な信号に関する計測技術開発と完全埋込型を達成するための小型化、無線化技術の開発を進める。

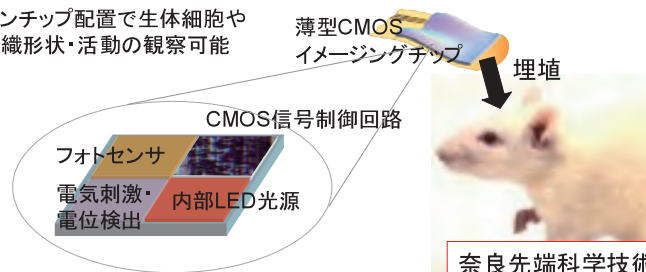
コラム：CMOS センサー技術

脳内の活動を計測する手法としては、時間・空間分解能が高いが侵襲的な皮質への電極刺入による計測と時間・空間分解能で劣る脳波等の非侵襲的な計測に大きく分けられる。米国では精度に優れた刺入電極による臨床研究が進められている。多重電極を皮質に刺し、数十カ所の電極からユニットレコーディングにより得られた電気的活動を利用するものであるが、脳への傷害の程度は高いと考えられ、また、長期間の使用による炎症や電極の劣化が問題とされている。時間・空間分解能が比較的高く侵襲性がより少ない計測技術が望まれているところであるが、この可能性を有する技術としてCMOS センサーによるイメージング技術が研究されている。サブミリメートルの空間解像度でミリ秒程度での計測が可能である。特に光による計測は、センサーチップそのものを生体適合性材料により包み込むことにより、傷害の程度を極力低減した計測技術となりうる可能性を有している。

埋込型バイオイメージセンサチップ

- ・ 脳神経イメージング技術
 - 観察深さ
 - 空間分解能
 - 時間分解能
- ・ 脳深部における機能イメージングを可能にするマルチモーダルCMOSセンサー

- 光・電位・イオン検出機能をワンチップで集積化可能
- オンチップ配置で生体細胞や組織形状・活動の観察可能



奈良先端科学技術大学院大学資料

非侵襲型の脳機能計測技術としてはfMRI、MEG、fNIRS、EEGが想定され、fMRIとMEGは据え置き型、fNIRSとEEGは可搬型である。据え置き型の計測機器は主に研究開発過程の高精度な計測に活用することになる。ただしリハビリテーションやトレーニング、遠隔操作や遠隔臨場感(テレグジスタンス)実現機器などの可搬性を必要としないIBITの技術に関しては、最終製品でも用いられる脳機能計測技術として研究開発を実施する。個別の計測技術自身としては既に開発が進んだ機器であるfNIRSやEEGの組合せなどの機器開発は今後進めていく必要がある。EEGは脳の

電氣的活動を計測するものであり fNIRS は脳血流量の変化を計測し脳の活動を捉えるもので、この性質の異なる信号を検出する EEG と fNIRS を組合せた計測機器開発は、可搬性を有する IBIT 開発において有力な技術であると考えられる。また、fNIRS は fMRI で捉えている脳信号と共通している点が多く、fMRI による研究成果を有効に活用することが重要である。

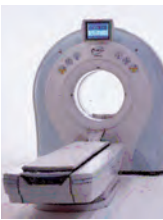
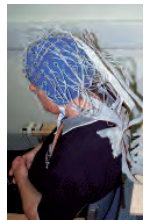
コラム：非侵襲脳機能イメージング

非侵襲的に脳の活動を計測する技術としては、fMRI、MEG、PET、fNIRS、EEG がある。それぞれ利用する信号は図にあるように様々であり、また、装置が必要としている大きさから、可搬性である EEG と fNIRS、据え付けで計測する大型の機器として fMRI、MEG、PET がある。

非侵襲 脳機能イメージング

Access to **your** success

- 神経活動を計測する
脳波計、脳磁計 (fMRI、fNIRS)
- 神経活動に伴う血流変化を測定する
PET、fMRI、fNIRS
- 神経活動に伴う代謝活動を測定する
PET、MRS

fNIRS	fMRI	PET	EEG	MEG
				
近赤外光 脳血流変化 (Deoxy-Hb, Oxy-Hb)	電磁波 脳血流変化:BOLD法 (Deoxy-Hb)	ガンマ線 脳血流変化 脳内代謝物質変化 (血流・代謝物質)	電位差 頭皮表面の電位差 (神経電流)	磁気 頭皮表面の磁気 (神経電流)

既存の非侵襲型脳機能計測技術に加えて、更に分子イメージング技術など多様な異分野融合研究による計測手法の開発が重要となる。生体信号を捉える計測技術、信号処理、パタン分類技術、画像再構成、脳の可塑性を利用した機能的再構築技術や新たなプローブ開発などを組み合わせた研究開発を実施する。

計測技術

Access to **your** success

異分野の融合研究

分子イメージング(蛍光・生物発光)技術との連携

- ・ **生体計測技術**
マルチモダリティ化 (EEG/fNIRS同時計測など)
新たなパラメータ (散乱変化など) の利用 など
- ・ **信号処理、パタン分類**
デコーディング技術
統計処理など
- ・ **画像再構成**
トボグラフィーからトモグラフィー (DOT)
- ・ **脳を活かす**
脳の可塑性 (機能的再構築) など
- ・ **発想の転換**
プローブ技術など新たな展開

信号からの情報の解析

脳活動の様々な信号を捕らえて、それを意味のある情報 (義手を動かすのに必要な情報など) に変換する必要がある。用いる信号はその計測手法によって様々であるが、現在非常に多くの信号から統計的な推定を用いて外部機器を制御する情報を生成する研究が進められており、この推定の精度を高める研究開発が必要である。特に推定に必要な信号を少なくすることや計算量を少なくすることが、実時間で多様な制御を実現するために重要である。

本来持つ生理的な身体の活動としては、意識的に行っている活動や無意識に行われている活動が存在する。意識的な活動としては、手足などの筋肉を動かす運動指令が良く研究されてきており、また、義肢や車椅子の制御などニーズが高くまた実現に近い技術が多く含まれている。運動指令としては動かしたいものの現在位置と運動の終着点の情報を与えてその間を運動させるわけであるが、可能な軌道は多く存在しその中のどの軌道を選択するかを決定する必要がある。現在欧米において実現されている外部機器の制御は冗長性が無く、かえってそのために特定の二点間の移動制御を実現している。しかしながら多様な生活環境において義手を動かすことを考えた場合、この方法ではヒトが自然に行っているように手の先の移動とともに肘を適切に動かすこと (他の物に当てないなど) を実現することは現状では困難である。本提案では、そのような多数の制御項目があっても

脳情報双方向活用技術
(I-B-T) とはI-B-T 研究に投資
する意義I-B-T プラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

I-B-T がもたらす
科学技術上の効果I-B-T により期待される
成果と社会・経済的效果I-B-T 研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

適切に制御を実現できるモデル開発やその実証研究を実施する。例えば脳の活動と複数の筋肉の収縮との関連を解析し、それを再現する制御機構を実現するなどの研究開発が想定される。

無意識に行われている活動にも反射のように自律的に筋肉の収縮を調節する活動があり、この制御機構は意識的な筋肉の制御機構と同様に解析できる。ここで解析された仕組みは制御情報への変換技術への応用とともに、外部機器自体の自律的な制御システムの構築に資するものである。一方、無意識に行われている活動には意識に上る前の判断や脳や身体の状態をモニターしている活動などが知られている。例えば、身体を制御するために運動時の筋収縮の力を検知していたり、血圧などの状態を常時モニターしている信号が神経系から発せられている。このような全身に内在的に張り巡らされたセンサーからの信号を解析し、身体や外部機器を制御するフィードバック技術の開発を実施する。また、より抽象的な脳活動としては、単純作業を実施している際に起こすケアレスミスに先立って見られる脳活動が近年報告されており、このような信号を利用してヒトが単純なミスを犯す前に注意を喚起する技術開発なども想定される（コラム）。

コラム：ヒトが意識する前の脳活動、例えば、単純作業のミスを起こす前に予知が可能？

脳神経系では意識されていない神経活動が多く存在する。血圧の調節や歩行の制御などの反射や周期的な信号によるセントラル・パターン・ジェネレーター（CPG）による制御などもその一つであり CPG 研究の成果は二足歩行ロボットの開発研究にも用いられてきている。

更には、身体の運動を起こす際に意識するより前に（動かそうと思う前に）生じている脳の活動が近年多くの研究で捉えられている。ある研究では、被験者が特定のボタンを押す際にどれを押すか決定する 7 秒前に、fMRI のシグナルからその被験者がどのボタンを押すかを当てることができるということが報告されている（Nature Neuroscience, 2008）。また、単純な作業を行っていると簡単なミスを起こすことはよく経験するが、脳活動を計測することで、このような間違いを起こす 30 秒前にミスする可能性が高まることを予測することができるという報告もなされている（Proc. Nat. Acad. Sci. USA 2008）。この予測が十分精度良く可能であれば、「もうじきケアレスミスを起こしそうですよ」といった事前警告を行い、ミスの発生を少なくすることも可能かもしれない。このような無意識のうちに生じている脳内の信号を利用することは様々な可能性を生むが、これを有効活用するためには、精度の向上とともに意識に上ってくる間にその判断が修正される機構などのより詳細な解明が必要であり、そのような研究が安全性の向上にもつながるものと考えられる。

抽出情報による外部機器等の制御

IBIT の成果から展開される外部機器としては、義手や義足といった障害を持つ方を支援する機器がまず想定される。こうした機器はこれまでも筋電情報を利用した義肢や脳波を用いた車椅子などの開発がすでに進められている。本提案においても、従来から進められている関連する技術開発は有効に利用されるべきあり、その既存技術の延長線上にあると考えられる。特に義手については、一つの方向性として筋肉の活動を脳活動から予測し、それを人工的な機器の制御に繋げる研究が重要である。目標としては、指先で物をつまむ動作や、ドアのノブを回すようなひねる動作などを実現できることがあげられる。いわゆる腕に当たるロボットアームではなく、指先も含めたロボットハンドの制御を目指す。現実には人が利用するためには、装着して生活環境の中でとり回しが効くように、小型化、軽量化が達成されなければならない。例えば多自由度を実現するために多数必要なモーターの重さを解決することなども求められる。手の運動生理学的な知見とその工学応用の研究が組み合わさった研究が必要と考えられる。

義足についてはより難易度が高い。義手と大きく異なる点として歩行はきわめて自律的に制御された運動であり、脳からの信号のみでは適切に制御することができない。脳からの指令はきわめて限定されたもので、どの程度の速さでどちらに向かうかといった情報を元に、そのときの姿勢やバランスなどをふまえて自律的に歩行を制御できる技術開発が必要である。脊髄などにおける不随運動、反射経路の研究とそれを義足の制御として実現する工学研究の連携が必要とされるところである。

人の移動に関しては、車椅子への応用が最も早く実現されると思われる。実際に脳波による前後、回転の制御が可能となっており、精度を高めたり誤動作をなくすなど、実社会での実用化を目指した研究開発の段階に入ってきている。このような機器と今後新たに開発される新しい脳からの情報を利用した制御システムの研究などを実施することになる。

コンピュータへの入力についても、カーソルの制御がヒトの脳波計測や脳内電極による神経活動記録などによって実現されてきている。文字入力についてもモニタ上のカーソルやバーを上下左右に移動させることでアルファベットや記号を指定する方法が用いられており、こうした入力技術の向上が一つのテーマである。一方で、言葉を想起する際の脳活動を利用して直接入力する方法の開発にも可能性が見出されてきている。具体的研究課題としてはワープロ等にも用いられている自動校正機構などを脳からの信号を用いた場合に生じる誤りの特性に応じた校正機構に改良する研究なども想定される。

脳情報双方向活用技術
(IBIT)とはIBIT研究に投資
する意義IBITプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBITがもたらす
科学技術上の効果IBITにより期待される
成果と社会・経済的效果IBIT研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

脳への情報のフィードバック技術

外部機器をうまく使うためには、動作を指令した後にそれがどのような動作を実際に示したのかを認識することが重要である。つまりフィードバックにより脳からの指令を補正する必要がある。このようなフィードバックループは外部機器の中だけで行う場合もあるが、適切な制御を実現するためには、脳自身の可塑的な変化を促すように、その情報を脳に戻す必要がある。この方法としては、身体感覚器を介して戻すものと、感覚器を介さずに直接信号を脳に戻すものが考えられる。多くの場合は、視覚や触覚などを通して自身が命じた外部機器操作の結果を知り、そのことによってフィードバック制御をかけることになる。例えばロボットハンドの指の先端に取り付けた圧力センサーからの信号を音に変えて知らせたり、皮膚に微弱な電気刺激として返すなどの技術開発が想定される。感覚器に障害を有している場合や感覚器から脳までの経路に異常がある場合には、より脳に近い部位からの入力が必要となってくる。そのような感覚入力を実現することは、いわゆる人工感覚器の研究開発と同義である。

人工感覚機の研究開発としては、人工内耳、人工網膜などの開発が進められている。それぞれ聴覚神経や網膜への信号の入力から、より中枢側の聴覚野や視覚野への入力に研究対象が移っていくことが考えられる。こうした神経系への入力に際しては、神経活動を記録する場合以上に神経への傷害をどのように回避するかが重要な研究課題となってくる。聴覚や視覚以外の人工感覚として特に注目されるのは触覚である。

脳への外部情報のフィードバックは、本来有している五感だけとは限らない。将来的には抽象的に処理された外部機器の状態をフィードバックとして用いることも想定される。例えば、外部機器が駆動する速度を視覚や聴覚としてではなく、直接その速度に応じた頻度の刺激に置き換えて入力する技術などが想定される。また、現在パーキンソン病の治療方法の一つとして実施されている深部脳刺激療法（Deep Brain Stimulation：DBS）の刺激の頻度や強さを脳内の状態をモニターして調節するような技術に代表される、人工的な脳内のフィードバック回路を実現するためには、こうした五感以外の入力技術の研究開発が必要とされている。

コラム：外部機器の操作を体になじませる情報のフィードバック

義手や義足の操作を身につけるためには、普通に人間がものを使用する場合と同様にトレーニングが必要である。通常手で物をつかむ動作において、目で見て上手く握めているかどうかを確認することもあるが、多くは触覚として柔らかさとか滑りやすいかなどなどの情報をフィードバックすることにより適切につかむことができ、また、適切に握む動作の習得も達成される。触覚だけではなく対象物がどれくらいの重さであるかは筋肉の張力として検知されているし、歩行においても地面からの反力をやはり筋肉にかかる張力として検知し、それらを無意識下に反射運動に反映させることで、状況に応じた適切な運動を実現している（下図）。我々が自然と行っているこのような外部との相互作用を上手く取り組むことは、IBITにおける非常に重要な研究開発課題である。

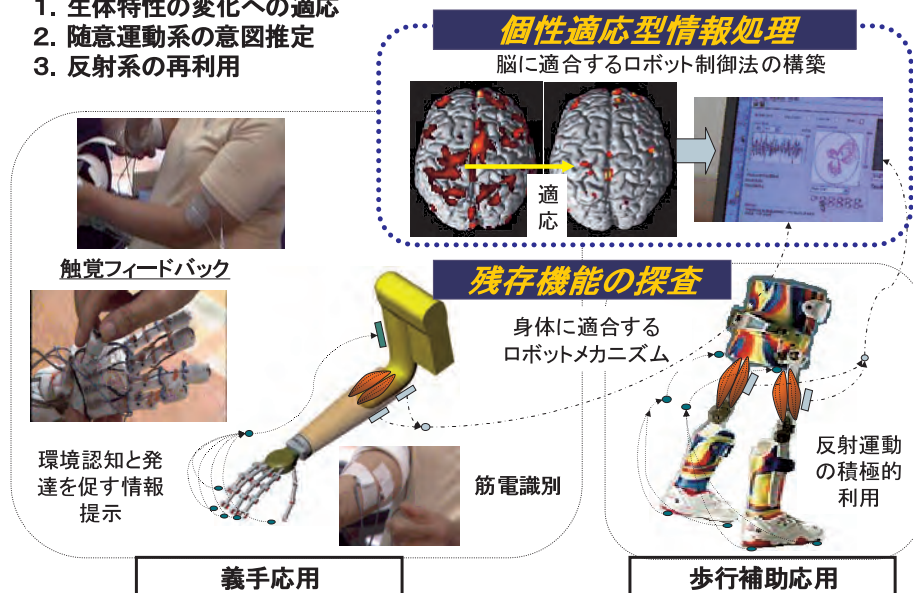
これまでの筋電信号による義手の制御研究からは、握ったという触覚の情報を被験者にフィードバックさせることにより、安定した制御能力の獲得が実現できている。脳活動をモニターしながら訓練の経過を追うと、訓練前は運動野や視覚等の感覚野の反応の範囲が広く、強く活動が観察されるのに対し、感覚フィードバックを入れた訓練後には、そういった活動の範囲が限定され義手が本来の手と同様の使われ方をしているようになることが示されている。

こうした現象についてはまだよく判っていないのが現状であるが、自分の手のように義手を取り扱えるようになるためには、感覚フィードバックによる脳の可塑的变化についてより理解し、それを機器の製造やトレーニング手法の開発に取り入れていくことが必要である。

「脳を繋ぐ」研究概要・横井浩史（東大・精密）

個性適応型情報処理の課題と残存機能の利用方法論

1. 生体特性の変化への適応
2. 随意運動系の意図推定
3. 反射系の再利用



脳情報双方向活用技術
(IBIT)とは

IBIT研究に投資
する意義

IBITプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBITがもたらす
科学技術上の効果

IBITにより期待される
成果と社会・経済的效果

IBIT研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

脳の可塑的变化の適正化

外部の状況を脳にフィードバックすることにより様々な脳機能が可塑的に変化することが知られている。先にも述べたように義手や義足などの運動制御を習得する際には、この脳の変化により適切な運動を実現することができる。コンピュータのカーソル操作などこれまで脳波などにより実現されている外部機器の制御についても、トレーニングを受けていない被験者が右や左のどちらにカーソルを動かしたいのかを読み取るものではなく、逆にトレーニングによりヒトが自身の脳活動を変化させることで脳の信号パターンをコンピュータが理解できるように調節していると見るのが適当である。

このように自身が操作したものからフィードバックにより情報が返ってくるという脳と外界の双方向の情報のやりとりを通して、脳自身が変化することを支援・促進する手法は、IBIT の中核となる重要な研究課題と考えられる。健常人によるトレーニング過程の可塑的な脳機能変化を解析することに加えて、身体が麻痺している方や身体の一部を失われた方など実際に障害を負われている方において脳活動がどのようにトレーニングで変化するかを解析する必要がある。現実には、障害を持つ方と健常者との間において活動が異なることが知られている。またヒトに人工的な障害を引き起こす研究は実施できないので、実験動物として霊長類を用いた障害モデルによる検討を実施する。

一方、このような脳の可塑的な活動の変化を解析することは、外部機器を巧みに使用すること以外に、リハビリテーション技術の開発にとっても必須である。脳機能イメージング技術の進歩により、身体の麻痺から回復する過程が解析可能となってきたが、IBIT を用いた脳の可塑的变化の支援は、このリハビリテーションの程度を促進するものとしても期待されている。手を使うリハビリテーションの過程については、fMRI の適用が可能であり研究自身も盛んに実施されているところであるが、歩行の障害からの回復過程については、可搬性でない fMRI の適用が困難であり、他の脳機能イメージングを組み合わせた研究課題の設定が必要となる。

4 章 研究開発の推進方法

情報・リソースの共有化

本提案で実施される研究開発は非常に多岐にわたるため、そこで得られる情報・リソースの共有は、全体の効率化を高めるために必須の要件である。特に、霊長類や人の臨床研究により得られるデータは取得が困難なものであり、また倫理的にも余分な研究の実施は極力排除する必要がある。このため、脳計測のデータなどは共有できるデータベースを構築し、データ取得者以外にも利用可能とするべきである。この共有の促進のためには、当該研究で得られたデータが他者の研究によって活用された程度をその研究の評価としてカウントすることが必要である。デコーディング手法などは特に様々なアイデアにより試されることが重要であると考えられるので、決まった規格で取得されたデータを一般に公開し、デコーディング性能を競うコンペティションを行うなど、研究領域に直接関わっていない研究者、あるいは一般人の知見を取り込む方式も採用する。

侵襲型、低侵襲型、非侵襲型計測に基づく技術開発間の連携

時間軸の章にも記述しているが、侵襲型の脳計測から低侵襲、非侵襲へとシフトしていくことが技術開発の過程で想定されている。そのため、侵襲型の技術を用いた初期の研究を実施する際も、次世代のより侵襲性の低い技術への移行を視野に入れた研究計画が望ましい。脳内のユニット電極記録と fMRI のデータとのリンケージ等、侵襲的な計測で得られたデータを非侵襲の計測と繋ぐ研究課題を初期から内包させることが望ましい。また、目的とする操作技術をふまえた計測技術開発が必要であるが、侵襲型で期待される精密な操作技術に対応した非侵襲型の計測データの処理技術も当初から研究対象として取り込み、異なる計測技術を中心とした両者の研究開発の相乗効果を狙ったコーディネートが必要である。

臨床研究への接続

医療技術開発を目指す研究課題は、最終的な臨床研究のフェーズを念頭においた基礎研究を実施すべきである。想定される最終的なアウトカムが現実の医療技術になりうるよう、サル等を用いる基礎研究の開始当初より人に対する安全性をどう確保するかを計画段階で十分検討することが必要である。特に侵襲型の計測技術を伴う研究開発については、それ自身がそのまま人に適応できないものであってもよいが、その技術・手法からどのように安全な技術に接続していくかの構想が求められる。

脳情報双方向活用技術
(IBIT)とはIBIT研究に投資
する意義IBITプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBITがもたらす
科学技術上の効果IBITにより期待される
成果と社会・経済的效果IBIT研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

倫理に関する取り扱いや社会受容性に関する対応

人に対する臨床研究に移行する場合は、当然倫理委員会による審査が必要であるが、非侵襲計測などを用いて人を対象とする基礎研究を実施する場合も、インフォームドコンセントや当初予想されなかった脳の疾患などが判明した際の告知の手順等、倫理に関わる問題を十分精査し研究を実施することが必要である。

IBIT 技術の一部は人の心を読む技術ともなりうるので、そのような技術が社会に対してどのような影響を与え、それを社会がどう受容すべきか、あるいは拒否すべきかなどについて、研究の進展にあわせて一般の意識調査や社会的なコンセンサスの形成に取り組むべきである。この場合特に留意すべき点としては、多くの IBIT 技術は、人の心そのものを読むものではなく外部機器を操作するために、訓練により操作に適した脳活動を作り出しているものであることを認識すべきである。これはその操作という目的のために可塑的に変化した脳活動であって、一般の訓練を行っていない人の脳活動から、何を考えているかを読み取ることができる技術ではない。それぞれの研究課題によってこのような本質的な違いがあることをふまえた上で、倫理的な問題点に留意し、また、社会に対して情報を発信していくことが肝要である。

全体をコーディネートするヘッドクォーターの設置

要素技術については大学等の単一の拠点における研究で実施可能なものも存在するが、わが国の現状を踏まえると、プラットフォームの形成には複数の研究拠点が連携する枠組みが必要である。こうした連携推進の役割を担うためには、拠点間のネットワークをコーディネートするヘッドクォーターを研究開発独法、あるいは、大学共同利用機関に設置することが重要である。このヘッドクォーターはバーチャルな機関ではなく、共通のリソースの提供や基盤技術の開発を通して、プラットフォームの活動に実質的に組み込まれていることが必要である。また、倫理を含めた社会受容性にかかわる検討を実施する機能や、基盤的成果をプロトタイプの開発や製品の設計につなげるために産業とかかわる各省庁の政策や企業の研究開発に移行させる機能など、プラットフォーム全体にかかわる機能を担い、そうした全体構想を踏まえて調整を進めることが重要である。現在のわが国における体制からは、本プラットフォームは脳科学全般に関わることを取り扱う文部科学省科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会及び学術分科会学術研究推進部会の下に設置された脳科学委員会における脳科学の長期的展望とともに検討されることが望ましい。

5 章 IBIT がもたらす科学技術上の効果

人間の脳の機能を理解するためには、脳へ入力された情報が脳内でどのように処理され、その結果としてどのように情報が出力されるのかを明らかにする必要がある。脳内において情報がどのようにコーディングされているかといった IBIT の研究開発の過程で蓄積される知見は、こうした入力・処理・出力の関連を示すことにつながり、脳における情報処理機構を理解する上で、大きな進展をもたらすものと予想される。

身体を介して環境・社会と脳が相互作用することにより発生する「こころ」の問題にせまる大きな一歩として位置づけられる。このヒトの「こころ」を対象とした科学技術は、従来観測に基づく相関関係を主体とした研究であったが、IBIT で実施される研究開発により、脳の状態を操作しながらその機能についての理解を行ういわゆる「操作的脳科学」領域を確立していくものと考えられる。

霊長類では現在見出されているミラーニューロンなど脳内に内部モデルがどのように形成されているのかといった問いに対する研究が活発になってきている。IBIT の研究開発の実施によってその研究領域が更に活性化され、脳の内部モデルによって我々がどうやって外界を認知できているのか、他者をどうやって理解しているのかといった、「こころ」の本質的な命題に挑む突破口を与えるものと期待される。

このような心の問題についての生物学的な研究の進展は、人文・社会科学の様々な研究領域に波及効果をもたらす。心理学、認知科学にはこれまでの行動といった表現形による尺度に加えて、脳内の活動を知ることにより、より客観性の高い評価尺度を手に入れることができる。またそのような技術群を通して、認知科学で得られる知見を人間を対象とした技術として社会に展開することも可能となる。

芸術などのこれまでは作品として表されるものを通して議論されてきた美や快などといった対象についても、脳活動計測を通じた視点が活発に取り入れられるようになるものと考えられる。現在も欧米において「神経美学」がその萌芽を表しつつある。更に、哲学についてもこれまでの内省にもとづく理解に加えて、脳活動を指標とした議論が進展するものと思われる。特に、人が意識する前に脳内で処理が進められている事実が近年明らかとなりつつあり、いわゆる「自由意志」に関する議論は今後こうした研究領域の成果をきっかけに、急速に見直しが進められる可能性がある。

一方、身体の生理学的な理解についても新たな状況が生まれてくるものと想定される。脊髄における反射機構などに加えて、自律的に歩行の様式を切り替えたり、系統だった一連の運動パターンを生じさせたりするより

脳情報双方向活用技術
(IBIT)とはIBIT研究に投資
する意義IBITプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IBITがもたらす
科学技術上の効果IBITにより期待される
成果と社会・経済的効果IBIT研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

高次の運動制御の生理的機構についての研究が進展する。こうした領域の進展は、自律的な運動制御機構を持つ人工物の創成などの工学的応用にも発展することが期待される。また、感覚受容や認知の研究も進展し、センサーの開発やものの識別に関する工学技術の研究開発も活性化される。

更に、人の身体機能を制御する技術として、医療工学に関わる基盤技術の開発にも大いに貢献するものと考えられる。義肢などの身体機能補助機器の開発は当然であるが、生体情報の取得に関するセンサー開発や情報処理技術の開発などにより、自律神経系による身体制御に関わる医療技術や、人工感覚器、機能電気刺激技術、脳深部刺激技術などの多くの医療工学技術の開発に直接の影響を与える。また、麻痺に対するリハビリテーション技術をはじめ、脳機能を向上させることにより達成できる医療技術全般についても大きく進展させる効果が期待される。

情報工学的には、ヒューマンインターフェースに関わる技術開発に大きな貢献をもたらし、人間による機器への情報入力や人と人とのコミュニケーションに関わる通信技術などで、新たなインターフェースの開発などつながるものと考えられる。また、よりユーザーフレンドリーな仕様を備えた製品開発にも結びつく。

6章 IBIT により期待される成果と社会・経済的效果

IBIT は、身体により制限された人間の機能を拡大する様々な技術の基盤を創出するものである、その波及効果は、人間が携わる仕組み全般に及ぶものである。

人間の機能が身体により制限されるとは、

1. 事故や疾病により手足などを消失したことにより、ものをつかむことや立って歩くことが容易には出来なくなること、
2. 麻痺により運動機能や感覚機能が十分発揮できないこと、
3. 考えているよりタイピングが遅い、感じていることを十分伝達できない等の制約、
4. 経験、状況、あるいは年齢に伴う変化等により、個人毎に脳機能（身体的能力も含む）に差が生じること、
5. 無意識の間に脳が調節している身体機能や判断、等が相当する。

このような制限から開放されることは、人間が外部機器を制御すること一般と関係するが、大きく分けると、1) 障害により身体を動かせない方が機器を動かせる技術、2) 人がより快適に機器を操作できる技術、3) 人間では今までできなかったような高度な機器の制御技術、といった外部機器の制御への関わりが想定される。また、機器の制御技術以外として、4) 脳機能の活性化（トレーニング）、5) 脳機能を活用したサービス、などへの展開が想定される。

当然このような技術が実を結ぶまでにはその困難さに応じて長い時間が必要とし、また、原理的にも達成できる限界も存在すると考えられるが、これまでなし得なかった技術が生まれてくることも確かである。こうした成果からの波及効果をすべて予測することは困難ではあるが、様々な人間が関わる技術に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

1) 障害により身体を動かせない方が機器を動かせる技術

全身が麻痺したような疾患、例えば筋萎縮性側索硬化症（amyotrophic lateral sclerosis、ALS）が進行した患者では、筋肉の活動を信号として利用することも困難であり、意思を伝えたり外部機器を動かすためには脳活動を利用する技術が必要である。また、脊髄損傷の患者や手足を消失した方々においても、より自由に外部機器を使用することに対する期待は高い。IBIT 技術が活用されることにより、多自由度の義肢や車椅子を動かすことができるようになれば、自分で作業をすることができる種類も増え、行動範囲も拡大し、社会への進出がより容易になるものと考えられる。また、

自身の手足を脳からの指令による電氣的な刺激で動かす機能的電気刺激（FES）を組み合わせた技術は、自身の身体機能を回復させることになり、機械的な機能回復だけではなく、自分の体を取り戻すという意味で精神的にもその生活の質（QOL）を大きく高めることが期待される。このように体の不自由な方々が自立的に活動することができるようになれば、その方々自身への恩恵はもちろんのことであるが、支援を行っている介護の方の負担を軽減することにつながる。こうした患者、及び、介護者の社会への進出を促すことは、少子高齢化の社会において多様な労働力を生み出すという視点からも重要である。

2) 人がより快適に機器を操作できる技術

考えるだけで機器のオンオフを切り替えるものから、マウスや、コントローラーといった入力デバイスへの応用、さらには脳キーボードともいえる入力手段がまず想定される。こうした入力機器の開発により、人間の置かれている状況などによってこれまでは制限されていた機器操作により柔軟性が付与される。手がふさがっている状況や込みいた場所での機器の仕様が可能となる。また、これまでの手で操作するコントローラーなどと比べて、より自由に操作が行えるロボットハンドなどの開発が促進される。さらに、従来の手などによる入力操作と合わせてより操作性を高めた機器の開発などが期待される。

3) 人間では今までできなかったような高度な機器の制御技術

人間は手足などの身体を動かそうとした際、実際に筋肉が動くまでに時間遅れを生じている。このような時間遅れを脳活動から直接機器操作を行うことで解消できる可能性がある。人が判断してすばやく作業を実行する必要があることを可能にし、これまでは間に合わなかったような緊急時などの対処を可能とする技術を提供する。

速い制御を可能にする技術としては更に、様々な判断が意識に上る前にその情報を利用する技術などの可能性も考えられる。ある判断を下す際にまだ決断していないと思っている段階で無意識に決断が下されている場合があるが、そのことを利用して物の識別などを迅速に行う技術なども想定される。

運動に関しては、人間は本来四本の手足を利用しているわけであるが、例えば同時に六機のロボットアームを制御するなど、従来の身体を通して実現できる作業を越えた自由度を持つ機器操作の支援技術が提供されることも考えられる。

4) 脳機能の活性化手法（トレーニング技術）

脳への身体活動情報のフィードバックによるリハビリテーション技術の開発が期待され、例えば、脳梗塞などによる身体の一部の麻痺や言語障害などを回復する技術への応用が考えられる。また、スポーツや機械操作などの能力を向上させる運動機能のトレーニング技術としても展開することが可能であると考えられる。トレーニングとしては、運動機能だけではなく認知や判断の機能の向上、更には、記憶の促進などといった機能向上を実現する技術も想定されている。3) で示されていたような、これまでの人間では達成できなかった高度の制御技術を実現するためにも、こうしたトレーニング技術が活用されるものと考えられる。

5) 脳機能を活用したサービス

脳は身体の様々な情報をセンシングし処理している。この脳活動をモニターすることにより全身にセンサーを埋め込んだのと同様な身体情報を得ることができ、これを利用した健康診断サービスなどが考えられる。このような技術は在宅での精密健康診断などを実現し、健康長寿の達成に寄与することが期待される。

また、脳活動をモニターすることにより居眠り状態を確認し通知するシステムや、ケアレスミスが生じる状況を警報するサービスなどが提供できるようになる。大規模システムの操作者の脳活動モニタリングによる事故の防止など、公共の安全性確保に資する技術の提供が期待されるところである。

生理的な状態だけではなく、個々人の嗜好や快、不快などを計測し、例えば消費者のニーズにより適した製品の開発や、個人の心の状態に応じたサービスの提供などを実現することが想定される。いわゆるニューロマーケティングによる経済活性化の達成とともに、消費者に提供できる商品の質を格段に向上させることにより、その生活の質の向上に繋げることが期待される。

脳情報双方向活用技術
(IB-T)とはIB-T研究に投資
する意義IB-Tプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

IB-Tがもたらす
科学技術上の効果IB-Tにより期待される
成果と社会・経済的效果IB-T研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

7 章 IBIT 研究開発の時間軸

研究開発全体としては、初期に障害者などの個人にとって要求度の高い技術に向けた研究開発が実施される。この中には侵襲性の高い脳活動計測を伴うものが含まれる。運動野からの精密記録による四肢の運動を実現する技術などの基盤開発が進められるが、このフェーズの研究は安全性の確保のための研究開発が特に重要と考えられる。

これと同時に、非侵襲性の脳計測技術を主体とした健常人に対する技術開発が進められる。この技術は当初得られる情報が乏しいため、少ない情報で実現できる比較的単純なアプリケーションの実現に向けた開発が主体となる。

より後期には、侵襲性の脳計測技術で達成できた精密な制御技術を非侵襲性技術に移行させる研究開発の促進、及び、脳の高次機能に由来するようなこれまでの人間活動では達成できなかったような機器制御や、サービスへの展開が実施される。

基礎的な知見を得る研究から具体的なアプリケーションの開発へといずれも移行していくが、侵襲性の高い技術から非侵襲性の技術へとシフトしていきながら、そうした基礎研究から応用研究への研究が平行して実施されていくものと考えられる。

想定される研究開発のフェーズ

短期（5 年後に達成）

- (1) 侵襲型・非侵襲型で重度の障害を持つ方のための限定された必須機能の回復に資する機器の開発：例としては yes/no の判断に基づく機器制御、知的 DBS、人工知覚など
- (2) 非侵襲型で、一般向けに作製されるゲーム機の限定的な補助入力装置やニューロマーケティング（製品・コンテンツ評価など）への応用技術

中期（10 年後に達成）

- (3) 侵襲型で、障害者及び運動機能が極度に低下している高齢者用の高機能運動能力の回復機器やリハビリテーション技術
- (4) 非侵襲型で、健常者も含めた情報弱者に向けた情報通信機器への使いやすいインタフェース、パワースーツやロボットの制御、ある程度複雑な運動の再構築など

長期（20 年後に達成）

- (5) 侵襲型で、著しく侵襲性の低いデバイス（柔軟可動電極、生体材料プローブなど）を活用した高自由度の外部機器制御技術
- (6) 非侵襲型で、高機能の一般用コンピュータインタフェース、自動車安全運転システム、無意識の読み取りとマーケティングへの活用

8章 検討の経緯

戦略ワークショップ（脳・神経科学分野）

開催日：2005年3月3日、4日

場 所：箱根プリンスホテル

報告書：科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ（脳・神経科学）

報告書 CRDS-FY2005-WR-07

俯瞰ワークショップ

開催日：2006年8月10日

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

報告書：俯瞰ワークショップ「ライフサイエンス分野の俯瞰と重要研究領域」報告書 CRDS-FY2006-WR-17

フェロー会議

開催日：2006年11月14日

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

タイトル：18年度重要研究領域の深掘「ブレイン・マシン・インターフェース」（BMI）

戦略ワークショップ（ブレイン・マシン・インターフェース）

開催日：2006年11月27日

場 所：JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

報告書：科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ「ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）」分野報告書 CRDS-FY2006-WR-15

脳情報双方向活用技術
（I-B-T）とは

I-B-T研究に投資
する意義

I-B-Tプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

I-B-Tがもたらす
科学技術上の効果

I-B-Tにより期待される
成果と社会・経済的效果

I-B-T研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

プログラム

- 9:00～ 9:30: 挨拶、趣旨説明、BMI研究動向の概要説明
(JST/CRDS担当者)
- 9:30～12:00: 話題提供者プレゼンテーション(発表10分、質疑5分)
「BMIから生みだされると期待される重要な社会的価値」とその実現プラン
- 飯島敏夫先生: 出力型BMI(侵襲型)
 - 神谷之康先生: 出力型BMI(非侵襲型)
 - 不二門尚先生: 入力型BMI(人工感覚器)
 - 片山容一先生: 入力型BMI(脳機能の操作・回復)
 - 鈴木隆文先生: デバイス技術
 - 清水公治先生: 非侵襲計測技術
 - 加藤天美先生: 皮膚電極計測技術
 - 横井浩史先生: ロボットメカニズム
- 12:00～13:00: 昼食
- 13:00～14:50: BMI研究開発を構成する要素に関する討論
- 14:50～15:10: 休憩
- 15:10～17:00: 総合討論
- 17:00～ 懇談会



WS討論者

(敬称略、順不同)

- 脳・神経
 - － 川人光男(ATR・脳情報研)
 - － 伊佐正(生理研)
 - － 神谷之康(ATR・脳情報研)
 - － 北澤茂(順大・医)
 - － 飯島敏夫(東北大・生命科学)
 - － 河野憲二(京大・医)
 - － 高田昌彦(東京都・神経研)
 - － 長谷川良平(産総研・脳神経情報)
- 臨床
 - － 片山容一(日大・医)
 - － 加藤天美(阪大・医)
 - － 不二門尚(阪大・医)
 - － 宮井一郎(森之宮病院)
- 情報、計測、ロボット、材料等
 - － 鈴木隆文(東大・工)
 - － 横井浩史(東大・工)
 - － 小池康晴(東工大・精密工学研)
 - － 清水公治(島津製作所)
 - － 池田思朗(統計数理研)
- 生命・脳神経倫理
 - － 佐倉統(東大・情報学環)
 - － 入来篤史(理研BSI)
 - － 福士珠美(RISTEX)
 - － 室山哲也(NHK・解説委員室)



G-TeC (米国)

日程: 2007年1月22日～1月31日、2006年2月7日～2月14日
報告書: G-TeC 報告書「ブレイン・マシン・インターフェース」(米国)
CRDS-FY2006-GR-07

氏 名	所 属	役 職	専 門
長谷川 良 平	産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門	研究員	侵襲型 BMI
福 士 珠 美	科学技術振興機構 社会技術研究開発センター	研究員	神経倫理
大 武 美保子	東京大学 人工物工学研究センター	助教授	神経工学
神 谷 之 康	国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所	研究員	非侵襲型 BMI
森 本 淳	国際電気通信基礎技術研究所 脳情報研究所	研究員	ロボット学習
吉 田 明	科学技術振興機構 研究開発戦略センター	フェロー	脳・神経科学

訪 問 先	長谷川	福士	大武	神谷	森本	吉田
アリゾナ大学	参加	参加				参加
カリフォルニア工科大学	参加	参加				参加
ワシントン大学	参加	参加				参加
ノースウエスタン大学	参加	参加				参加
シカゴリハビリテーション研究所	参加	参加				参加
クリーブランド FES センター	参加	参加	参加			参加
ハーバード大学	参加	参加	参加			参加
マサチューセッツ工科大学	参加	参加	参加			参加
ニューヨーク州保健局	参加	参加		参加	参加	参加
コロンビア大学	参加	参加		参加	参加	参加
ピッツバーグ大学	参加	参加		参加	参加	参加
スタンフォード大学	参加			参加	参加	参加
南カリフォルニア大学				参加	参加	参加
UCLA				参加	参加	参加

フェロー会議

開催日：2007 年 3 月 13 日

場 所：JST 研究開発戦略センター 2 階大会議室

タイトル：ブレイン・マシン・インターフェース G-TeC 報告書、戦略プロポーザルに向けて

外部研究会発表（第 2 回「脳を活かす」研究会一般講演会）

開催日：2007 年 4 月 15 日

場 所：学術総合センター 一橋記念講堂

タイトル：ブレイン・マシン・インターフェース関連領域の研究開発戦略立案に向けて

戦略プロポーザル検討会議

開催日：2007 年 4 月 17 日

場所：八重洲通りビル 6 階 第一会議室

参加者、日時、等

- 討議者 (敬称略)
川人光男(ATR):コーディネーター
伊佐正(生理研):脳科学
加藤天美(阪大):脳外科
横井浩史(東大):機械工学
星宮望(東北学院大):機能的電気刺激、電極
- 日時:2007年4月17日 16時～19時
- 場所:八重洲通ビル6F 第一会議室

フェロー会議

開催日:2007年4月24日

場 所:JST 研究開発戦略センター 2階大会議室

タイトル:戦略プログラム「脳情報双方向活用技術」(案)について

9 章 海外の状況

本提案に関連した研究開発は米国において活発に推進されつつある。G-TeC 報告書「ブレイン・マシン・インターフェース」(CRDS-FY2006-GR-07)の内容を抜粋し、2007年3月13日のCRDS内のフェロー会議にて説明を行った資料を中心に当該技術開発の状況の概要を以下に示す。

侵襲型BMIの方向性

- 侵襲型BMIの研究者コミュニティは、それぞれのグループが非常にコンペティティブな印象をうけた。
- 計測手法や部位にそれぞれ特徴があり、それによってデコーディングの手法や外部機器の操作といった点についても異なる手法を必要としているため、他の手法より優位性を示す必要性が強いようである。
- 別の見方では、どの手法も他と比べて性能面での優位性を確保できていないことを示している。

侵襲型BMIの方向性2

- 人への適用
 - 脳の皮質に刺入する電極を用いた臨床研究は、FDAの承認を得てブラウン大学のDonoghueグループによる研究が実施。
 - これ以外にアリゾナ大学のMcNaughton研究室、カリフォルニア工科大学のAndersen研究室も2007年～2008年にFDAの承認をとって臨床研究を開始することが判明した。
 - 別の侵襲型BMIとしては、硬膜下に平板電極を置くECoGによる研究が実施されている(ワシントン大学、クリーブランドFESセンター等)。この方法は、てんかん等の脳外科手術の際に開頭しECoGを留置して数日を過ごす患者に対してボランティアを依頼して行われている。

脳情報双方向活用技術
(I-BIT)とはI-BIT研究に投資
する意義I-BITプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

I-BITがもたらす
科学技術上の効果I-BITにより期待される
成果と社会・経済的效果I-BIT研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

非侵襲型BMIの方向性

- 脳波計測に歴史があり、共通の計測手段を用いて開発が進められているため、研究者間の情報の公開・共有が進んでいる。
- 脳波計測に優れている欧州(ドイツ)との関連性が強い。
- 脳波以外の非侵襲計測技術をBMIに活用する動きはほとんど見られない。
- ロボットアーム制御の性能に関しては、侵襲型と現状では大きな差異はないが、これ以上の性能向上を達成できるかは不明。
- カーソル操作を用いた文字による意思伝達技術が主要な目標である。
- 非侵襲型BMI研究者の中でも低侵襲型(EECoG)の研究を並行して実施する研究者が出現してきている。

デコーディング技術 外部機器制御技術

- 少ない信号からデコーディングし外部機器を制御することを目指す研究者が増加している。
- BMI技術開発の初期には、外部機器側に自律的な制御システムを組み込むことが必要と考えている。
- 多自由度を同時に制御することが求められるが、非常に困難である。
- 歩行制御の要望は強いが、現状では困難であり余り取り組まれていない。

電極・デバイス開発

- ヒト組織中に長期間留置し記録・刺激が可能な電極開発が大きなボトルネックになっているが、解決の目処は立っていない。
- 安全性の長期試験に対する予算処置が乏しく困難である。
- 埋め込みデバイスの小型化、無線化の研究開発がベンチャー企業などで精力的に進められている。

FESとBMI研究の融合

- FESの臨床研究は米国が圧倒的に優位。
- BMIによるFES制御（ロボットではなく自身の身体を直接制御）に研究が向けられつつある。
- ロボットアーム、ハンド、レッグの制御技術開発にとってもFESに関わる身体の運動制御機構の情報は有用と考えられる。

脳情報双方向活用技術
(I-B-T)とはI-B-T研究に投資
する意義I-B-Tプラットフォームに
おける具体的な研究開発課題

研究開発の推進方法

I-B-Tがもたらす
科学技術上の効果I-B-Tにより期待される
成果と社会・経済的效果I-B-T研究開発の
時間軸

検討の経緯

海外の状況

融合研究体制

- 共通の目標（主要な技術）が設定され、各拠点では余り大きく目標を広げない。
- トップのリーダーシップにより研究者をリクルートし、近接した地域に多くの異分野研究者が集積している。
- 飛行機で1時間程度の距離は融合体制にとってさほど問題とはなっていない。
- 多様な研究者の連携と成果の受け渡しが迅速である。
 - ロボット工学の研究者とはまだ十分連携できていないように思われる。
 - 相互に情報の共有を計るため、ミーティング、ワークショップの開催を積極的に企画している。
- 技術支援体制が整備されている。
 - 精密機器開発などのベンチャー（NIHがサポート）との連携やNSFが出しているNational Nanotechnology Infrastructure Network (NNIN)が用されている。
- 小規模な融合研究体制でも、新規なアイデアの創出には有効であり、しかもまだそういったレベルの研究成果が将来的に中心な技術になる可能性を秘めている。

米国のファンディング

- DARPAも投資しているが、BMI技術による運動機能の再建については、退役軍人開発局（VA）の比重が大きい。
 - 現在の米国のBMI研究は神経義肢の開発が主体であるため。
- NIHも同様に神経義肢の研究開発として投資
- National Academies Keck Futures Initiative
 - Keck Foundationが15年間、4000万ドルを出資
 - Signaling（2003年）、Nanostructures（2004年）、Genomics（2005年）に続いて、
 - Smart Prostheticsのカンファレンスが2006年に開催された。
 - 2007年度には人工視覚や神経義肢に関する融合研究プロジェクトの実施される可能性が高い状況にある。

戦略プログラム

脳情報双方向活用技術

CRDS-FY2007-SP-17

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

平成20年3月

江口グループ（ライフサイエンス）

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03 (5214) 7481

ファクス 03 (5214) 7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成20年3月

©2008 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。