CRDS-FY2006-GR-07

G-TeC報告書
「ブレイン・マシン・インターフェース」（米国）

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

近年、米国を中心にブレイン・マシン・インターフェース（BMI）の研究開発が急速に発展してきている。特に、侵襲型BMIの研究開発は、我が国や欧州と比べて多くの研究者が取り組んでおり、政府としても大きな予算を投じていることが知られている。我が国における今後のBMI研究開発について検討するにあたり、多様な取り組みが進められている米国の現状と方向性を我が国の状況と比較することが必要であると考え、今回のG-TeCを実施することとなった。

本報告書では、米国におけるBMIに関連した主要な研究拠点（15カ所）を我が国の研究者と共に訪問し、インタビュー及び見学を通じて米国の当該研究の現状と方向性を確認した。着目点としては、脳からの信号抽出技術、電極開発動向、外部機器の制御等の技術レベルの現状、BMI研究開発と基礎的な脳科学研究との関連、ファンディング動向、研究支援体制、社会的な出口に向けての目標設定やコンセンサス形成がある。

米国の現状として、当該技術の特徴をふまえてきわめて融合的に実施されており、その環境が基礎的な段階から臨床応用の段階にまで貫かれているという点は注目すべきである。それぞれの要素技術の開発レベルにおいても、材料科学、精密工学、情報工学、細胞生物学、免疫学、脳生理学、行動学等の様々な背景を持つ研究者、技術者が具体的な目標を迅速に達成するために共同研究のネットワークを形成している。このような横の融合体制に加えて、脳の情報表現の解析に関する基礎的な研究段階のものから、動物による外部機器の制御技術開発の段階、機器の安全性の検討や臨床研究段階に入っているもの、更には市販機器の改善に至るまで、イノベーションの様々な段階にある研究や開発が縦にもリンクしている。先行している段階の研究成果や技術に関する情報が、次の段階の研究開発に活用されるよう、人材の交流や共通に利用できる技術や施設による支援体制が構築されつつある。特に、クリーブランドではこのような融合拠点の形成が進んでいるが、それを実現させるために大学、地域、州、連邦政府の各レベルで重層的な予算的裏付けを確保する努力を長年している。米国においても単独の予算のみでは継続性が必要な体制構築は困難であり、BMIのような長期的な取り組みのためには何重もの手当を獲得することが重要であるという指摘であった。

連邦政府からの研究開発支援としては、退役軍人研究開発局が重要な役割を担っているという認識であった。これは現在米国で行われているBMI研究開発の出口としては神経義肢の開発が主体であり、この受益者である負傷兵の医療に関わる退役軍人研究開発局が予算を投じていることと、臨床研究のための医療施設の活用、積極的なボランティアの参加などが、研究開発の推進に大きく貢献しているからである。

技術面からは、侵襲性BMI研究者の意見として研究開発の上で最大のボトルネックは、やはり電極開発であるとのことであった。安全で長期間安定に記録できることが最も大きな問題として考えられている。電極そのものの他に、微小な電源の確保、電荷注入による生体ダメージの軽減、生体内での回路の安全性確保、ワイヤレス化が共通な問題点として挙げられた。電極開発はBMIに限らず、生体の電気的記録及び刺激を利用した医療機器開

発の基盤技術であり、BMI研究開発とは別に電極開発に集中的に取り組む拠点の整備が急務であると考えられている。また、米国においても新規のデバイス開発には予算が付くが、その後の開発過程で安全性などの長期間の継続的な検証を要する研究開発に対する予算は乏しく、この点が生体に適用するデバイス開発全般にとって困難な点であるとのことであった。尚、このフェーズ（安全性が確認できる前）にはベンチャーファンドも十分投資を行わないようである。

米国におけるBMI研究開発の目標としては、予算面からも研究者の興味からも「脳からの運動を指令する信号を捉えてリアルタイムでロボットアームやコンピュータモニタ上のカーソルを制御する技術」に集中している。現段階では、電極を脳に刺して記録する侵襲型BMIと脳波を用いた非侵襲型BMIいずれにおいても、カーソル制御に関してはほぼ同等の性能を示している。また、皮質脳波（ECoG）を用いた低侵襲のBMIについても多くの侵襲型及び非侵襲型の研究者が興味を持ち、実際にヒトを対象とした臨床研究を実施しているグループでは、他の手法と同等の制御性能が実現されていた。ヒトのECoGによる計測自体は、脳外科手術と関連して我が国においても実施されており、このような貴重なヒトの脳活動情報の活用は、我が国のBMI研究開発の推進にとっても重要であると考えられる。

外部機器制御の研究開発と並行して、米国で臨床研究が盛んに行われている自身の筋肉への電気刺激により運動を制御する機能的電気刺激（FES）の研究とBMI研究との融合が進展している。あるグループでは、学習アルゴリズムを搭載したFESシステムを開発しており、将来的には脳活動での制御を目指していた。

FESも含めた侵襲型の臨床研究の実施にあたっては、倫理的問題に対して当然ながら着実な取り組みがなされている。2008年以降に予定されている侵襲性の高い刺入電極による臨床研究の実施にあたっても、受益者となる患者の意見を取り入れる場を設定することが計画されている。更に、脳波を用いた非侵襲型の研究開発についても、その推進にあたって公開ミーティングを開催するなど、BMI研究開発の展開に際して社会的コンセンサス形成に十分な配慮がなされている。

BMI技術の現状のレベルあるいは現在直接達成しようとしているレベルは、脳活動から一つずつ情報を取り出し、外部機器或いは自身の筋肉を制御するというものである。実際、その制御にはかなりの集中力を要するが、将来的には、とりたてて意識せずとも制御可能になることが求められる。そのためには、意識に上ってはいないが同時に処理されている複数の脳内情報を取り出し、それを外部で活用できるBMI技術の開発が必要である。また、そういった複数の情報を同時に抽出できるBMI技術開発が達成されれば、これまでにない情報処理システム開発などへの大きな波及効果をもたらすものと考えられる。

我が国においてBMI研究開発を推進するためには、諸要素技術開発の基盤整備の確立が重要であると共に、異なる分野間及び基礎から応用、開発への各段階の間での人材、技術、情報の交流を進める制度の整備や、研究者、技術者、支援者のマインドの変革が重要である。そのためには具体的ではあるが高い目標を設定し、自由な発想による研究者間の融合グループの形成、及び、その目標をスピード感を持って達成するためのフレキシブルな再編を促す戦略を構築することが重要であると考えられる。

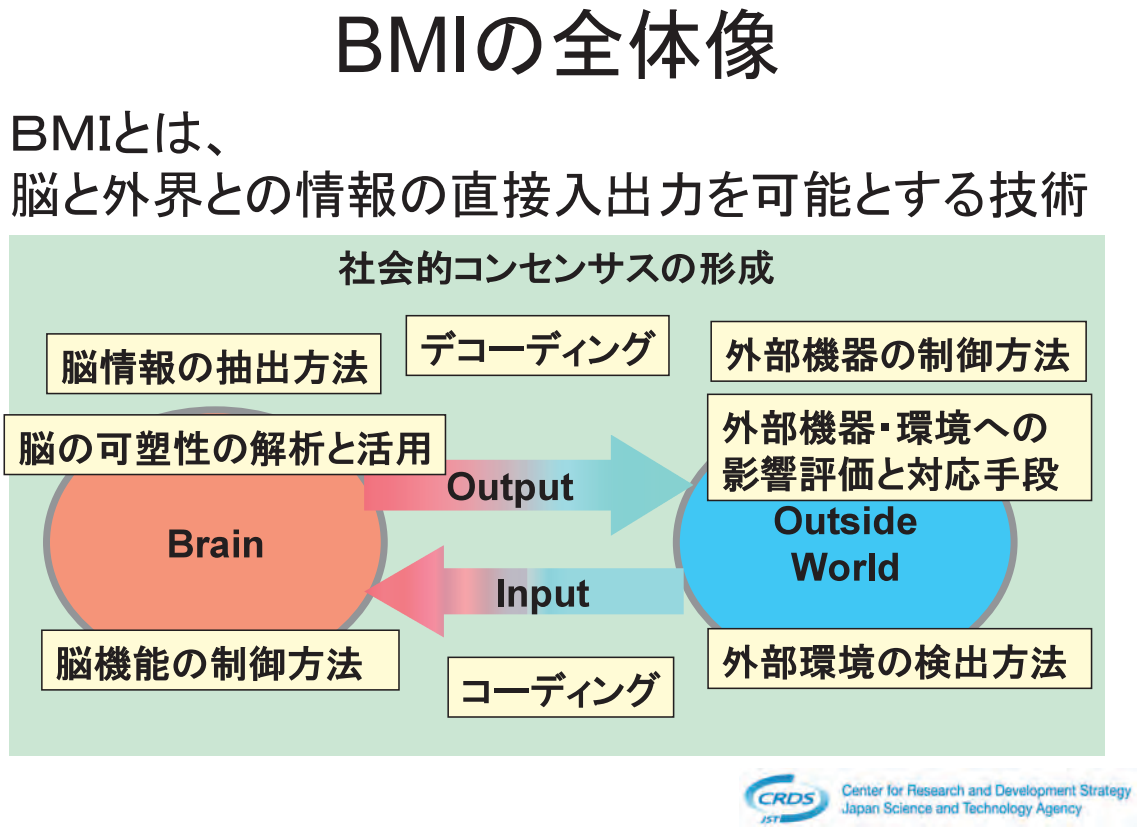
目　　次

エグゼクティブサマリー
目次
１．背景と目的 …… 1
２．訪問メンバー、訪問先、訪問期間 …… 7
３．米国の研究開発状況の概要 …… 13
　3.1．侵襲型BMIの方向性 …… 15
　3.2．非侵襲型BMIの方向性 …… 17
　3.3．デコーディング及び外部機器制御技術 …… 18
　3.4．電極・デバイス開発 …… 19
　3.5．FESとBMI研究の融合 …… 20
　3.6．融合研究体制 …… 20
　3.7．ファンディング …… 21
４．サイトレポート …… 23
　4.1．アリゾナ大学（ツーソン） …… 25
　4.2．カリフォルニア工科大学（ロサンゼルス） …… 27
　4.3．ワシントン大学（シアトル） …… 30
　4.4．ノースウエスタン大学（シカゴ） …… 36
　4.5．シカゴリハビリテーション研究所（シカゴ） …… 38
　4.6．ノースウエスタン大学（エバンストン） …… 39
　4.7．クリーブランド機能的電気刺激センター（クリーブランド） …… 41
　4.8．ハーバード大学（ボストン） …… 50
　4.9．マサチューセッツ工科大学（ボストン） …… 54
　4.10．ニューヨーク州立大学ワドワースセンター（アルバニー） …… 55
　4.11．コロンビア大学（ニューヨーク） …… 60
　4.12．ピッツバーグ大学（ピッツバーグ） …… 62
　4.13．スタンフォード大学（サンフランシスコ） …… 65
　4.14．南カリフォルニア大学（ロサンゼルス） …… 66
　4.15．カリフォルニア大学ロサンゼルス校（ロサンゼルス） …… 68

1．背景と目的

1．背景と目的

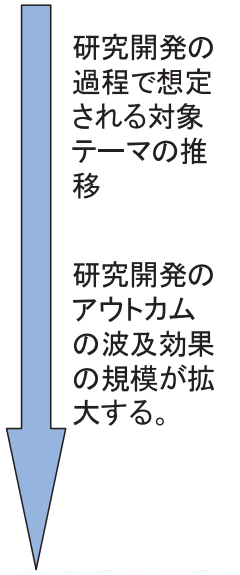
JST研究開発戦略センター江口グループでは、平成18年度に開催したライフサイエンス分野俯瞰ワークショップを経て、今後重要となる研究領域の検討を行い、その一つとして、脳の運動関連情報を基に外部の機器、コンピュータを制御する技術である「ブレイン・マシン・インターフェース（BMI）」を抽出した。同年11月に国内有識者を集めてBMIに関する深掘りワークショップを開催した。各ワークショップでの討議内容は別途報告書にまとめられているが、このBMI研究開発の全体像として、次図のようなものが浮かび上がってきた。研究開発の主要項目として、脳を主たる対象とした項目、外部（機器）を対象とした項目、及び、それを連結する項目が存在し、かつ、それらが融合して初めて最終的なBMI技術が成立するものであり、また、研究開発当初から社会的コンセンサス形成を必要とすることが示された。



BMI研究開発への投資意義は、疾患等による身体的な障害の克服といった医療面での有用技術といった面から、介護、さらには全ての人が新たな情報伝達手段を獲得するといったものまで、広範囲の社会的波及効果が期待されることにあることが示された（次図）。また、研究開発のロードマップ的にもBMIの対象が医療から一般への応用へと進み、技術面においても侵襲性の高い技術からより低いものが実現されることが予想された。

BMI研究開発への投資意義

- BMIの実現によって、「身体により制限されている人間の能力を拡大する」ことを実現する。
  - 疾患等による身体的な障害の克服
    - （例） 脊髄損傷患者の歩行を可能にする。
      人工網膜による視覚の回復
      半身麻痺のリハビリテーション
  - 自然な身体機能の低下を補助
    - （例） 介護を軽減する自立歩行等の補助
      明瞭な会話の支援
  - 手足等の身体を介さない情報伝達手段の獲得
    - （例） 超多自由度のロボット操作
      運動・認知機能のトレーニング
      身体では伝達困難な脳内情報の発信・受容
      思考の外国語への翻訳
      脳の記憶の外部保存

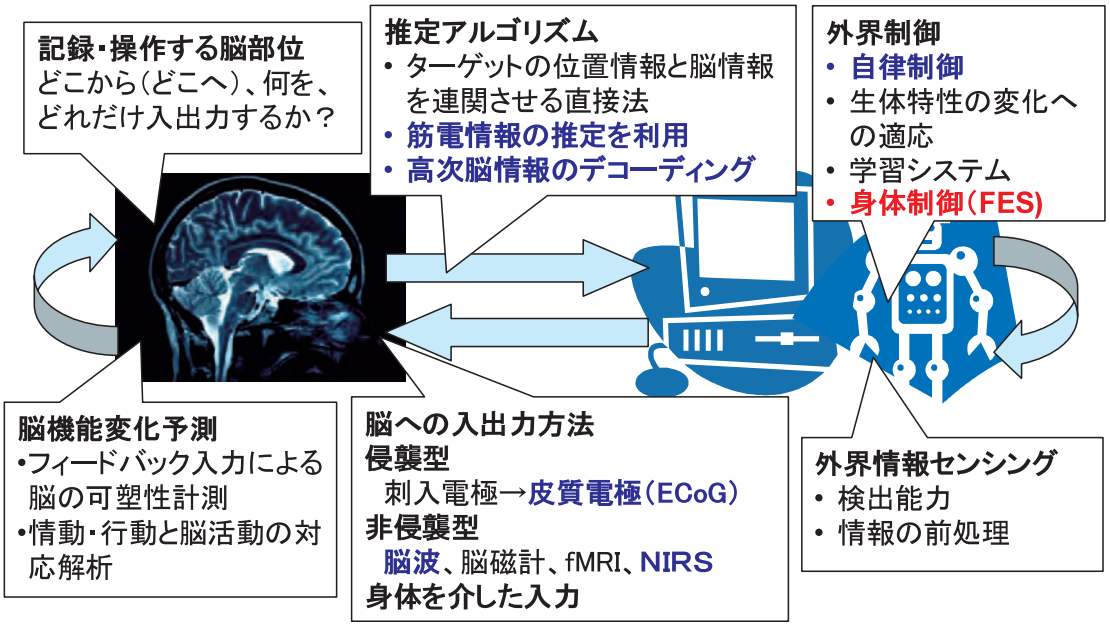


CRDS Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

近年、米国を中心にこのBMIの研究開発が急速に進められている。特に、侵襲型BMIの研究開発は我が国や欧州と比べて遙かに多くの研究者が取り組んでおり、政府としても大きな予算を投じていることが知られている。米国においても未だ技術的には試行錯誤の段階であり、どのような形で社会的な価値として現れてくるか不明な状況でもあるが、我が国における今後のBMI研究開発推進策作成に資するために、多様な研究開発の取り組みが進められている米国の現状と方向性を我が国の状況と比較しながら検討することが必要であると考え、今回のG-TeCを実施することとなった。

具体的に着目した点としては、脳からの信号抽出のレベルでは特に電極開発動向、外部機器の制御の技術レベルの現状、BMI研究開発と基礎的な脳科学研究との関連、DARPAを中心としたファンディング動向、研究支援体制、社会的な出口に向けての目標設定やコンセンサス形成がある。特に技術的な要素としては、深掘りワークショップにおいて指摘されたBMI研究開発の重要技術要素（次図）を参考にインタビューを行った。

BMIを形成する要素技術



CRDS Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

2．訪問メンバー、訪問先、訪問期間

2. 訪問メンバー、訪問先、訪問期間

（敬称略）

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

訪問先（拠点・組織名、インタビュー者、職位、所属部署）

University of Arizona
Bruce L. McNaughton
Professor, Psychology and Physiology
Chair, Graduate Interdisplinary Program in Neuroscience
Carol A. Barnes
Director, Evelyn F. McKnight Brain Institute
Regents' Professor, Psychology and Neurology
Andrew J. Fuglevand
Associate Professor, Department of Physiology
College of Medicine
Katalin M. Gothard
Assistant Professor, Department of Physiology and Neurology, College of Medicine

Neuralynx, Inc.
Casey Stengel
President, Neuralynx, Inc.

California Institute of Technology
Richard A. Andersen
James G. Boswell Professor of Neuroscience
Division of Biology
Daniel S. Rizzuto
Project Manager, Neural Prosthetics, Division of Biology
Jeremy L. Emken
Postdoctoral Fellow, Division of Biology
Ralph E. Lee
MR Education and Technology Manager, Caltech Brain Imaging Center
Shawn Wagner
MR Physicist, , Caltech Brain Imaging Center

University of Washington, School of Medicine
Eberhard E. Fetz
Professor, Department of Physiology & Biophysics
Associate Director, Washington National Primate Research Center

University of Washington, College of Engineering
Matthew O'Donnell
Frank and Julie Jungers Dean of Engineering
Rajesh Rao
Associate Professor, Department of Computer Science & Engineering
Paul G. Allen Center for Computer Science & Engineering
Yoky Matsuoka
Associate Professor, Department of Computer Science & Engineering
Paul G. Allen Center for Computer Science & Engineering

Children's Hospital & Regional Medical Center
Jeffery G. Ojemann
Associate Professor, Neurological Surgery
Director, Epilepsy Surgery

Northwestern University
Lee E. Miller
Associate Professor, Department of Physiology
Ferdinando Mussa-Ivaldi
Professor, Department of Physiology
Todd Kuiken
RIC's Director of Amputee Programs and Associate Dean for the Feinberg School of Medicine
Mark A. Segraves
Associate Professor, Department of Neurobiology and Physiology
Mitra Hartmann
Assistant Professor, Biomedical Engineering Department

Veterans Affairs Medical Centor
P. Hunter Peckham
Director, FES Center
Professor of Biomedical Engineering, Case Western Reserve University
Department of Orthopaedics, MetroHealth Medical Center
Jim Buckett
Senior Engineer, Cleveland FES Center
Technical Development Laboratory
Janis J. Daly,
Director, Stroke Motor Control/Motor Learning Laboratory
Associate Director, Cleveland FES Center of Excellence
Louis Strokes Cleveland Department of Veterans Affairs
Department of Neurology, Associate Rank
Case Western Reserve University School of Medicine
Ronald J. Triolo
Executive Director
APT center (Technical Foundations for Clinical Innovations)
Louis Strokes Cleveland, Department of VA Medical Center
Dustin Tyler
Director of Design & Prototype Division
APT center (Technical Foundations for Clinical Innovations)

MetroHealth Medical Center
Michael W. Keith
Chief, Hand Section
Professor, Orthopaedics Biomedical Engineering, Case Western Reserve University
John Chae
Director of Research, PM&R
Associate Professor, Physical medicine and

Rehabilitation, Biomedical Engineering, Case Western Reserve University

Case Western Reserve University
Patrick E. Crago
Allen H. & Constance T. Ford Professor
Chairman, Department of Biomedical Engineering
Dawn M. Taylor
Assistant Professor of Biomedical Engineering

The Cleveland Clinic Foundation
Cameron C. McIntyre
Assistant Staff, Department of Biomedical Engineering

Harvard Medical School, Massachusetts Eye and Ear Infirmary
Joseph F. Rizzo III
Director, Neuro-Ophthalmology
Department of Ophththalmology
Jinghua Chen
Research Fellow/ Postdoctoral Research Associate

Cornell University, Cornell NanoScale Science & Technology Facillity
Douglas Shire
Research Engineer, Department of Veterans Affairs, Center for Innovative Visual Rehabilitation

Massachusetts Institute of Technology
Ann M. Graybiel
Walter A. Rosenblith Professor of Neuroscience
Department of Brain and Cognitive Sciences
Investigator, McGovern Institute for Brain Research
Emilio Bizzi
Institute Professor
Investigator, McGovern Institute
Yasuo Kubota.
Research Scientist, Department of Brain and Cognitive Sciences and McGovern Institute for Brain Research
William A. Drohan
Research Engineer, Department of Veterans Affairs, Center for Innovative Visual Rehabilitation
Shawn K. Kelly
Visiting Scientist, Research Laboratory of Electronics

New York State Department of Health
Lawrence S. Sturman
Director, Wadsworth Center
Jill Taylor
Deputy Director, Wadsworth Center
Theresa M. Vaughan
BCI Project Coordinator, Wadsworth Center
Jonathan R. Wolpaw
Research Physician, Wadsworth Center, Nervous System Disorders
Professor, School of Public Health, Biomedical Sciences
Xian Yun-Cheng
Associate Peofessor, Wadsworth Center, Nervous System Disorders
Aiko Thompson
Post Doctoral Associate, Wadsworth Center, Nervous System Disorders

Columbia University
Michael Goldberg
David Mahoney Professor of Brain and Behavior in the Departments of Neurology, Psychiatry, and the Center for Neurobiology and Behavior.
Columbia University College of Physicians and Surgeons
Jacqueline P Gottlieb
Assistant Professor, Center for Neurobiology and Behavior

University of Pittsburgh School of Medicine
Andrew B. Schwartz
Visiting Professor, Department of Neurobiology

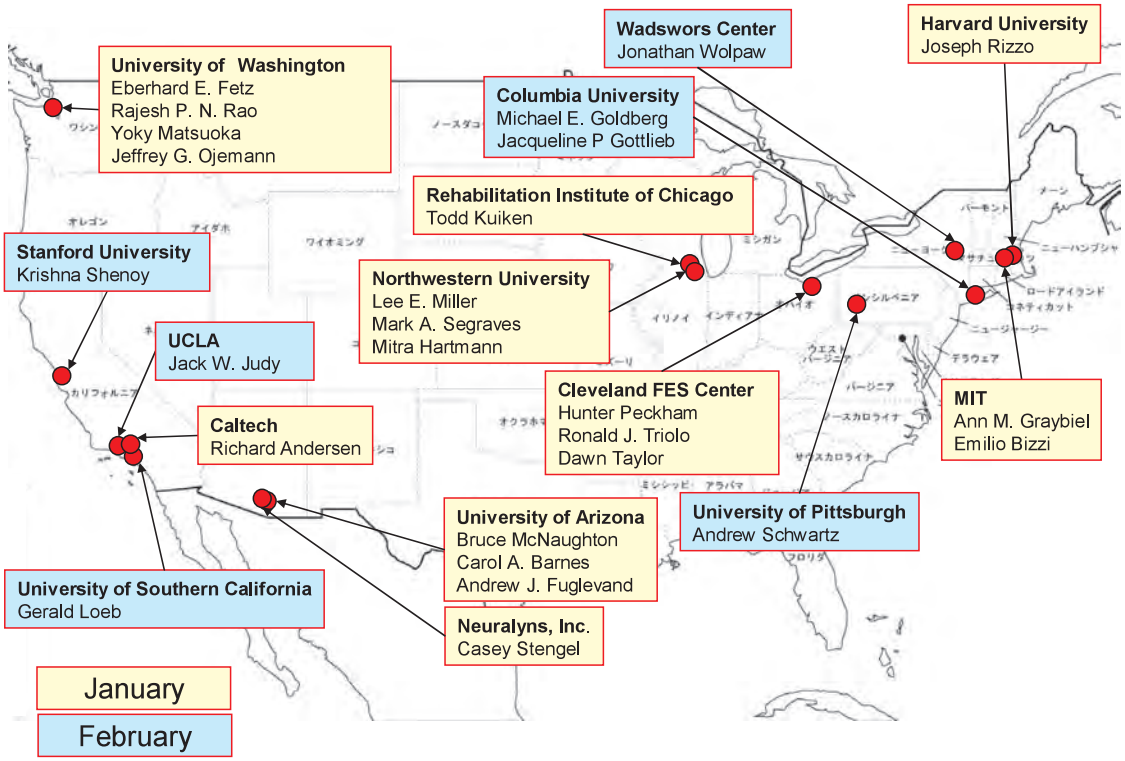
Stanford University
Krishna V. Shenoy
Assistant Professor, Department of Electrical Engineering & Neurosciences Program
Paul G. Allen Center for Integrated Systems

University of Southern California
Gerald E. Loeb
Professor, Biomedical Engineering
Director, Medical Device Development Facility
Alfred E. Mann Institute for Biomedical Engineering

University of California, Los Angeles
Jack W. Judy
Associate Professor, Department of Electrical Engineering
Chair of the MEMS and Nanotechnology Field
Director of the NeuroEngineering Program
Co-Investigator for CMISE (Institute for Cell Mimetic Space Exploration)
Gene Fridman
Graduate Student, Biomedical Engineering Department
Neuroengineering, Cochlear Implant, Brain Machine Interface

Badelt Engineering
Steven W. Badelt
President, Badelt Engineering
Biomedical Design Specialists

The G-TeC tours for BMI



訪問拠点と主要なインタビュー研究者

訪問日程

訪 問 先	訪 問 日
アリゾナ大学	1／22
カリフォルニア工科大学	1／23
ワシントン大学	1／24, 25
ノースウエスタン大学	1／26
シカゴリハビリテーション研究所	1／26
クリーブランドFESセンター	1／29
ハーバード大学	1／30
マサチューセッツ工科大学	1／30
ニューヨーク州保健局	2／7
コロンビア大学	2／8
ピッツバーグ大学	2／9
スタンフォード大学	2／12
南カリフォルニア大学	2／12
UCLA	2／13

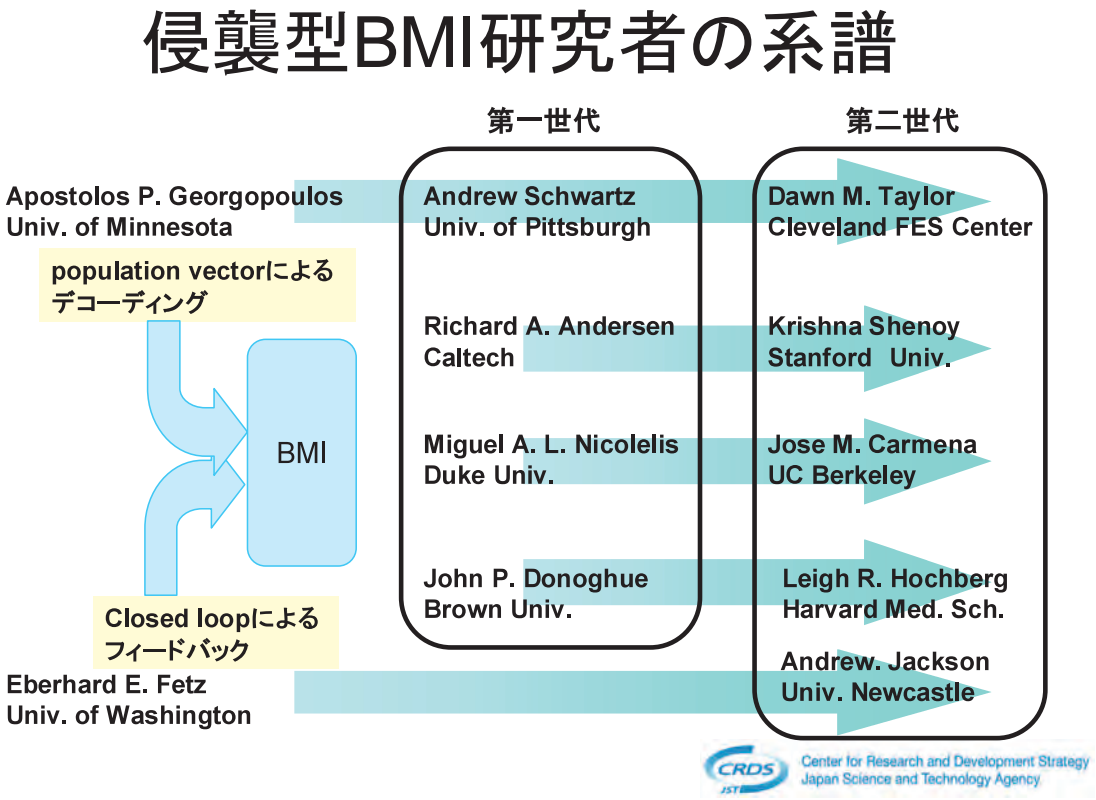
3．米国の研究開発状況の概要

3．米国の研究開発状況の概要

3.1．侵襲型BMIの方向性

侵襲型では脳生理学の基礎的な研究を行ってきた米国の４カ所の研究室が中心となってBMI/BCI研究を牽引している。これらの第一世代の研究者のラボから最近第二世代の研究者が独立し、応用的な研究を更に発展させようとしている。

脳生理学の基礎的研究過程で出現したポピュレーションベクターによるデコーディング技術とクローズドループによるフードバック制御技術が合わさって、現在の侵襲的BMI技術へとつながってきているとも考えられる。



侵襲型BMIの研究者コミュニティーは、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、共通の基盤の上で研究を発展させる雰囲気よりも、他の手法より優位性を示す必要性の方が現状では勝っているようである。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。

脳の記録部位としては、筋肉の運動を直接コードしている一次運動野からの記録が先行しているが、より高次な領野からの記録による外部機器の制御も実施されるようになってきており、実際の運動情報のデコーディングよりもフィードバックを介した脳の可塑的変化を利用したBMI技術も着目されてきているようであった。この中には判断や意思といったもののデコーディングが含まれている。更に記録部位の探索のために脳イメージング研

究との融合が計られている。fMRIによってヒトの脳の機能マップを汎化するプロジェクトも進行中であり、主に運動の実行中と想起中の両方に活動する部位、想起中のみに活動する部位の特定を目指している（カリフォルニア工科大学）。一方で、サルの脳であれば、10*10のアレイ１個で手腕のほとんどの領域をカバーできることが経験的にわかってきているので、事前に皮質内電極の装着部位を推定する必要はない段階に達している（ノースウエスタン大）。

ヒトの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されているが、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。その際には、受益者となる患者の意見を聞く場を設定することが計画されている。

ヒトに対する別の侵襲型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ものである。ECoGを用いたBMI技術は、現在カーソルをコントロールできる段階にまで達している（ワシントン大学）。ヒトでのECoG計測自身は、現在の我が国においても実施されており、このようなヒトからの貴重な情報を活用できるよう取り組むことが望まれる。

脳表面電極によるカーソル操作

対象者
重度のてんかんのために脳の一部を切除する治療が必要な患者

方法
手術前に硬膜下にECoG電極を留置し数日計測を行う。（通常の治療行為。日本においても通常実施されている）
電極からの信号を用いて、コンピュータモニタ上でのカーソル操作を行い、操作可能になる。
手術後には電極を除去。

Credit: Jim Bryant/Seattle Post-Intelligencer
http://seattlepi.nwsource.com/local/203984_brain16.html

CRDS JST Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

刺入タイプの電極を使用している研究に関しても、これまで電極数を増加させて情報量を大きくすることに主眼がおかれていたようであるが、今回の調査では、より少ない電極

数で外部機器の操作を可能する方向にも関心が高まっていることが伺われた（カリフォルニア工科大学）。この方向性は、デコーディング技術の向上に伴う動きであると共に、侵襲性を低くするという考えにも沿っている。また、刺入型電極で成果を上げている研究室においても、より低侵襲のECoGを研究していることが確認され、深堀りワークショップで指摘された侵襲型BMIの方向性としての低侵襲性やECoG研究の重要性を指摘する意見も多く聞かれた。ただし、精緻な運動の実現には刺入電極でなければ実現できないと考えている研究者も多く、その実現のためには長期間記録することができる電極の開発が重要であることで、全ての研究者の意見は共通していた。

低侵襲性という意味で興味深かったのは、非侵襲BMI開発の中心的人物であるDr. Jonathan Wolpaw（ワズワースセンター）が、ラットを用いての実験であるが頭蓋骨にビスが刺さる程度の穴を空けて、硬膜の上から電極を当てて記録する方法で、数日間の連続記録をとっているものである。昼夜の概日リズムを記録しているところであるが、BMIに応用可能であれば、おそらく最も侵襲性の低い記録方法と考えられる。

3.2. 非侵襲型BMIの方向性

非侵襲型BMIは今回の訪問先では全て脳波EEGを用いた方法であった。深堀りワークショップでEEGと共に可能性のある手法としてあげられた近赤外分光法（NIRS）による研究開発は、インタビューで確認した範囲でも米国では主要な研究開発の対象となっていないようであった。

脳波を用いたBMIでは、皮質電位P300と運動感覚野の事象関連律動変化の二つが主流であり、それぞれ要求される制御タスクにより使い分けが進んでいる。具体的には、選択肢が少ない場合はP300による制御の方がうまく行くが、選択肢が増えてくる２次元制御の場合は運動感覚野の事象関連律動変化の方がよいと考えられるいる。脳波計測の技術的なアーチファクトとして最も大きいのは額関節運動によるノイズであり、このノイズ取りには、各研究室とも注力しているようであった。

非侵襲型BMI研究者のコミュニティーは、侵襲型BMIに比べて相互によく情報を共有しているようであった。計測機器が市販されており、その共通の基盤の上にソフトウェアの改良等を進めていることがその背景にある。コミュニティーの中心人物のJonathan Wolpaw（ワズワースセンター）は、自身が開発し市販している脳波BMI装置であるBCI2000に関して、その制御用ソフトウェアの入ったパッケージは無償で標準型プログラムがダウンロードできるようにしており、利用者が自由に変更・改良して個々の需要に合わせられるようにしている。

また彼は、BCI2000ワークショップと銘打ったBMI/BCI研究に携わる研究者の国際会議を2002年と2005年に主催した。IEEE内でもワークショップなどを主導的に企画・運営してきたがどんどん参加者が増え自分だけの手に負えなくなっている。次回2008年にBCI2000ワークショップを主催してくれる人・団体を募集中である。このBCI2000ワークショップはNIHがサポートして開催されたものであるが、欧州を初め中国、韓国、

シンガポール等アジア各国からも参加している。しかしながら日本からの参加者はなく、こうした国際協調の枠組みに至急我が国が関わっていくことが必要であると思われる。

3.3. デコーディング及び外部機器制御技術

外部機器としてコンピュータモニタ上のカーソル制御から、ロボットアーム制御やロボットに作業をさせるといった研究成果が示された。

まず、カーソル制御に関しては、ユニット電極記録レコーディングによるデコーディングでは、一週間程度でサルは手を動かさなくても神経細胞の活動だけでカーソルをうまくターゲットに向けて移動可能な技術レベルに達している。また、局所電場電位（Local Field Potential, LFP）記録によるデコーディングに関しては、パワースペクトルの計算による方法が試行中であり、現在、１本の電極から相対する２方向のターゲットへの運動軌跡をデコードするに足るLFPが記録できている（カリフォルニア工科大学）。

深堀りワークショップでは、位置情報を直接外部機器に与えるのではなく、筋肉の収縮情報に一旦変換する間接的な手法が、筋電情報の取り扱いに優れている我が国として優位性をもてる方法ではないかとの意見が示されていた。しかしながら、後述するように米国では、自身の筋肉に電気刺激を行い動かす治療法である機能的電気刺激（FES）の研究とBMI研究との融合が進みつつあり、脳活動から筋肉活動を推定する研究についても急速に発展している。中でもノースウエウスタン大学とクリーブランドFESセンターとの共同で行ってた、KINO arm（ロボットアーム）を用いてサルに水平面上での腕の運動課題を行わせ、運動中の一次運動野の神経細胞活動より、位置、速度、加速度、関節トルクを推定し、関節トルクによってBMIの制御が可能かを試している研究は、注目に値するものであると考えられる。

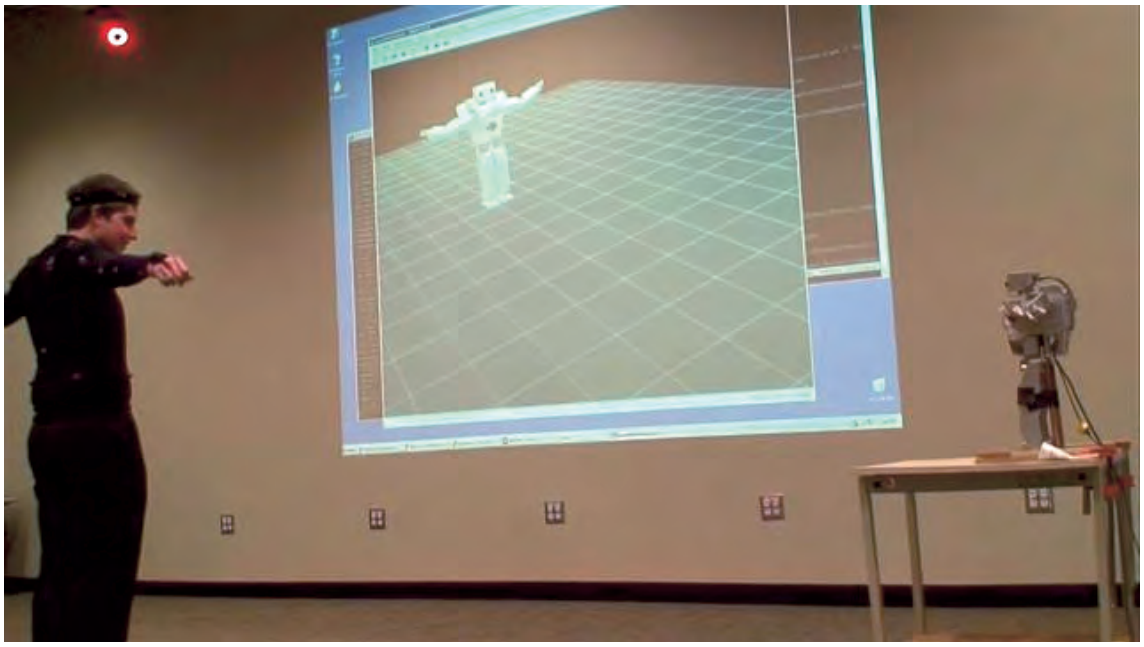
更に、筋紡錘にSensor（pressure）transducerを埋め込んで一次体性感覚野の3a野へのフィードバックを試みており、サルの基礎実験からヒトの神経義肢のよりよい制御のための固有受容フィードバックシステムの構築を目指している。こうしたフィードバックループを用いた双方向型BMIは多くの研究室において研究対象となっている。

ロボットアームの制御に関しては、実機での運動制御の前にバーチャルリアリティーのロボットアーム制御を初期の実験レベルで活用しようとする動きが多くのラボで見られた。実機で制御されるロボットアームとしては、27自由度のロボットアームを制御できるBMIシステムの開発などが行われている状況である。

また、腕ではなく指の動きも含めたロボットハンドの制御に向けた取り組みも始まりつつある。ロボットハンドでは、19自由度のロボットハンドにファンドが投じられている。特にこうした多自由度の外部機器の制御には十分な脳からの信号を抽出することができない状況であるので、当初はロボットハンド側の自律性（人工知能による制御：スマートコントロール）の比重を多くし、徐々に神経からの信号制御の比重を多くさせて、神経系と人工知能の速やかな協調メカニズムを構築していくことを狙っている（ワシントン大学）。

このロボット側の自律性を高める点においては、ワシントン大学のRao研究室の取り組

みが興味深いものであった。彼らは、模倣学習（Mimicry Learning）によってロボット側の自律制御能力を高め、ヒトには脳波からの非常に限られた選択だけをさせる方法で、ヒト型ロボットによる特定の物体を特定の場所に移し替えるという作業をさせることを実現していた。



3.4. 電極・デバイス開発

電極の開発では長期間記録できることが最も大きな問題として考えられている。この解決策は未だ見つかっていない状況であるが、現在用いることのできる電極の長期安定性や安全性についての研究は精力的に進められている。

クリーブランドFESセンターでは、FESやDBS研究の短期的な目標として、電極技術を向上させて、小型化し、生体適合性を高めることにとりくんでいる。パルス幅や周波数、電圧や電極形状と配置など、パラメータが多く、どのような刺激が効果的であるかについて、さらに研究を進める必要があるとしている。Medtronic社製の刺激電極の皮質におけるダメージを調べ、その安全性を証明しつつもある。

一方、記録用電極についても退役軍人研究開発局のメリット・レビュー・プログラム（Merit Review Program）で、Field Potentialの信号検出の効率化のために、３年間で4種類のシステムを試すプロジェクトを実施中であった。

更に、筋電位を遠隔で計測するための無線電力送受信機や、アメフラシの結合組織にヒントを得た固さを変えることができる高分子ナノ複合体の開発、フラットタイプの神経電極を用いた神経束の一部の神経を選択的に刺激するための計算モデルなどが研究されていた。

このような研究がクリーブランドFESセンターで進んでいるのには、大学、研究病院、通常の病院といった施設ごとの連携とともに、何れの施設においても工学系、生物系、基礎医学系、臨床医学系の人材が実質的に交流できる環境が大きく寄与している。基礎研究

から社会に出るまでのどのフェーズにおいても、専門性の異なる人材が入り交じって活動していることが重要であり、役割の異なる拠点間を単に連結するだけでは、真の意味の融合研究の達成は困難であろう。クリーブランドではこのような環境を確立するために、大学、地域、州、連邦政府のレベルで予算的裏付けをとれるよう長年努力しており、いずれかのレベルのみでは継続性のあるサポートは不可能であるので、FESやBMIのような長期的な取り組みには、何重もの手当を獲得することが重要であるという指摘であった。

ハーバード大学の人工網膜開発プロジェクトでも指摘されたが、米国においても新規のデバイス開発には予算が付くが、その後の安全性などの長期の継続的試験につく予算が乏しく、この点が生体に適応するデバイス開発の困難な点であるとのことであった。尚、このフェーズ（安全性の確認前）にはベンチャーファンドもほとんど投資しないとのことである。

入力型BMIに必要な電極開発としては、微小な電源の確保、電荷注入による生体ダメージ、生体内での回路の安全性確保、ワイヤレス化が共通な問題点として挙げられた。

3.5. FESとBMI研究の融合

今回のG-TeCで強く印象を受けたのが、FESによる自身の手足の運動再建とBMIが融合しようとしている点であった。アリゾナ大学では学習アルゴリズムを搭載したFESシステムを開発しており、将来はECoGなどの脳活動での制御を目指している。ノースウエスタン大学では、末梢神経系の機能を遮断された部位に、リアルタイムで推定したEMGの信号を電気刺激として与え、実際の筋を収縮させ手首の屈曲、伸展をさせることに成功しており、次は手の内在筋の刺激による運動再現を目標としている。クリーブランドFESセンターでは、NICHDのファンドによって、Cyberkinetics社のシステム（Braingate）と自分達の3Dリーチング運動をリンクさせたFESの上腕機能回復における効果の研究をしており、最終的には刺激装置の開発と商品化を目標としている。その際、最終的な患者への適応という観点から、機能的電気刺激において不快にならない閾値の設定が重要であるという視点で取り組んでおり、FES刺激を伴うリハビリ訓練にはQOLのスケールである、CHART（Craig Handicap Assessment and Reporting Technique）スケールを用いて効果を計っている。

3.6. 融合研究体制

脳・神経科学、臨床研究、脳イメージング、電極開発等の脳や身体を対象とした研究については、多くの研究拠点で融合的な研究が進んでいる。一方で、外部機器、特にロボット開発については、まだ十分な融合的研究推進体制が構築されてはいない様に見られた。そのなかでワシントン大学においては、ロボット学習に関する研究をバックグラウンドとする研究者（Dr. Rao）が主体となって外部機器側の制御機構も併せてBMI研究開発を進めている。

ロボット研究者がまだ十分融合する状況になっていない理由は不明であるが、BMI研究

者側からは外部機器に自律性を持たせる重要性が認識されているが、ロボット研究者の側の興味からみると、ロボットに持たせたい自律性は完全なものであって、ロボット自身で全て判断して行動するものを目指していて、人による操作が加わるものを研究対象としていないことが考えられる。この点の興味は日米とも同じであり、そういった研究者が同一の興味を持つ対象を設定していくことは、実質的な融合研究を進める上で重要な課題であると考えられる。

ワシントン大学では、新規分野の研究を推進するために、学部の部局内グラント（ポスドク２、３人分プラスセットアップ費用相当額）を設け、NIHのR01レベルの大型グラントを獲得するための準備段階の資金を提供できるシステムを持っているとの説明を受けた。また、実際にそのようなグラントを元に、Fetz研究室では、Neurochipの開発にElectronics Computationの専攻の大学院生と神経生理のポスドクの2名で取り組んできた。ある程度の専門性を備えた人材をうまく連携させれば、大人数で多額の予算を使わなくとも、性能の高いシステムをつくることはできることが示されている。この研究も最初は大学内の内部グラントでまかない、現在はNIHのR01を獲得したが、年間実質予算は５万ドルほどである。

BMI研究開発においては、それぞれの拠点で全て行うというよりも、それぞれ特徴的なものに絞り込んでいく姿勢が見られた。また、どの拠点においても、工学的な機器開発に関する基盤的なサポート体制が充実している。必要最小限のものは自前で用意するが、その規模や精度に応じて学内の共同施設、国レベルでの共同施設など、研究開発のスピードからみて適切と思われる施設のサポートを受けられるような体制を構築している。

融合をうまく進める上で、先にも述べたように共通の目的をどのように設定するかということが非常に重要視されている。BMI自体が通常の研究領域に比べてより具体性の示せるものではあるが、米国における個々のグループが掲げている到達目標は非常に具体的なものであり、その目標にスピード感を持って向かうことにより、異なる専門性を持った研究者、技術者がかなりうまく組み合わさって研究が進められていた。それでいて脳の動作原理解明というきわめて基礎的な興味も同時に持っている研究者がほとんどであったことは注目すべきであろう。

3.7. ファンディング

今回の訪問先で、DARPAのファンディングを受けている拠点の具体例を下記に示す。

- 身体の麻痺を有する負傷兵の自立支援、業務復帰支援のための研究でDARPAによるファンドを受けており、27自由度のロボットアームを制御できるBMIシステムの開発に取り組んでいる。同実験のために、バーチャルリアリティのロボットアーム制御の可能性も検討中。これは軍事のためではなく、ヒトのQOL向上を目指したものである。（カリフォルニア工科大学　Richard A. Andersen）
- 19自由度のロボットハンド開発のファンドを取得している。当初はロボットハンド側の自律性（人工知能による制御）の比重を多くし、徐々に神経からの信号制御の比

重を多くさせて、神経系と人工知能の速やかな協調メカニズムを構築していく予定。（ワシントン大学　Yoky Matsuoka）

- 退役軍人研究開発局とDARPAの違いとしては、退役軍人研究開発局は純粋な医療に関連した研究開発、DARPAは軍事応用のための研究開発、という定義ができるが、共に相補的であると考えている。例えば退役軍人研究開発局での研究成果は退役軍人のQOL向上に役立つほか、DARPAに還元され、戦場における損傷兵士の効果的な治療に使われる。（クリーブランドFESセンター）
- BMI/BCIに関しては、DARPAより主に退役軍人研究開発局のファンドで優先的に行われていると考えている。それは、リハビリテーション、神経義肢の開発に主眼がおかれているからである。（クリーブランドFESセンター）

BMI関連のファンディングとしてはNIH以外では、DARPA及び退役軍人研究開発局の軍関連のファンドが多いようであるが、米国ナショナルアカデミーとW.M. Keck Foundationが2003年に新しい融合研究のためのプログラムとして発表した「National Academies Keck Futures Initiative」（Keck Foundationが15年間、4000万ドルを出資）においても、Signaling（2003年）、Nanostructures（2004年）、Genomics（2005年）に続いて、Smart Prostheticsのカンファレンスが開催され、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。

4．サイトレポート

4．サイトレポート

個別のインタビュー内容やG-TeC参加者からの印象のレポートをもとに訪問した拠点、研究者等の個別詳細情報を以下に記す。

4.1．アリゾナ大学（ツーソン）

Evelyn F. McKnight Brain Institute

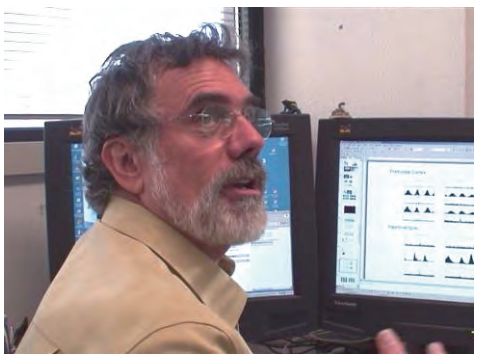
Evelyn F. McKnight Brain Research Foundationからの５百万ドルの基金とアリゾナ大学からのマッチングファンドをもとに2006年11月に設立された。アリゾナ大学からの予算は、Technology Research Infrastructure Fund（TRIF), the Arizona Alzheimer's Consortium, the Arizona Research Laboratories（ARL), the UA Vice President for Research, the UA Colleges of Social and Behavioral Sciences and Medicineからのものを含んでいる。

McKnight Brain Instituteは米国に４カ所有り、他は、フロリダ大学、アラバマ大学とマイアミ大学である。これらの研究所は、脳の正常な加齢あるいは疾患に伴う記憶の変化を引き起こす神経学的な変化を明らかにすることを目的としている。

今回の訪問では、心理・生理学研究室の教授でMcKnight Brain InstituteのメンバーであるBruce L. McNaughtonの研究室を中心にインタビューと見学を行った。

Bruce L. McNaughton

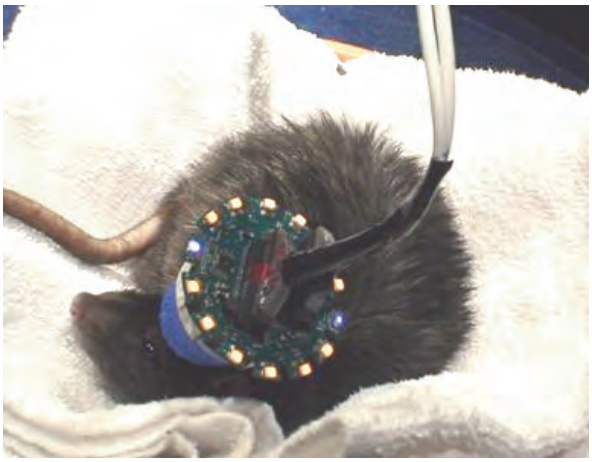
埋め込みテトロード電極による多チャンネル神経活動記録システム開発の先駆者である。元ポスドクが起業したNeuralynx社と相互発展し、現在も脳の神経細胞記録システムの開発を進めている。また、手続き記憶やエピソード記憶に関して基礎的研究成果をあげている。



- BMI技術に関連した多チャンネル神経細胞記録用の電極を独自に開発しており、それを用いて主にラットの空間記憶コーディングの研究を行っている。
- 1981年よりTetroと称する微小電極を用いた単一神経細胞レコーディングを開始。プロトタイプのものは12*4の電極であった。
- 14-30 gage tubeを用いて10μm depth resolution（50μm/day)、3-4 weeks at a given depth、表層から深層（２－３層）へと電極を進めて記録している。標

的は海馬および嗅周囲皮質領域である。

- 第２世代電極は2002年に発表（Science)、12*12で各チューブが基盤回路の個々のチャンネルに直接接続されている。ラバーによる絶縁により個々の電極の単離を実現している。
- 第３世代電極は12*20で基盤回路にプレアンプを内蔵しライセンス化している。電極のカバー上部に発光ダイオードを取り付けラットの頭部の動きを追跡するための信号として用いている（次図)。



Andrew J. Fuglevand

- ヒトの筋への挿入電極による機能的電気刺激（Functional Electrical Stimulation (FES)）の研究者。
- 健常者を対象とした詳細な行動実験によって、学習アルゴリズムを搭載したFESシステムを開発。将来はECoGなどの脳活動での制御を目指している。

Jean Marc Fellons

- 現在は、パッチクランプ法により記録した海馬スライスの単一神経細胞の活動を100-1000個の細胞のシュミレーションプログラム内に信号として取り込むことで回路の挙動を解析する研究を行っている。
- 将来的には個体の脳において同様の研究をおこないドーパミン系の操作を行うことを目的としている。

Casey Stengel

かつてBruce L. McNaughton研究室のポスドクで、現在、Neuralynx社の社長である。BMIにおける侵襲的な電極記録に関しては、彼のNeuralynx社と、Plexon社、及び、Cyberkinetics社の３社が世界的に使用されている機器の製造・販売を行っている。

- Tetro電極による多チャンネル細胞記録のためのデータ収集および解析システムを構築するツールを作成している会社を経営している。同社は、1983年に設立したMetBruce社に起源をもつ。

- Neuralynx社の経緯
  - 1993年　NIHのグラントによってNeuralynx社を設立した。
  - 1994年　NASAグラントによる宇宙空間における人体への影響に関する実験のデータ収集システムData Acquisition Systemの開発を担当した。
  - 1998年　スペースシャトルコロンビア号ColumbiaのNeurolabミッションを遂行した。
  - 1999年　Neuralynxの製品の世界市場規模での販売を開始した。

- 多チャンネルレコーディング機器Cheetah 160についての説明
  - 頭部・顔面の動きによるノイズを取り除くための性能向上をほどこす。
  - プロトタイプCheetah 32（64）型は8-64本の電極に対応した12ビットのADコンバーターによるアナログシステムで、Cheetah 160もアナログシステムだが24ビット、10*32チャンネルまで対応可能になっており、バッテリーにより10時間の連続使用が可能である。
  - 主なシステムはC++、Visual Basic、JAVA、MatLab等に対応可能である。
- コウモリに装着できる15グラムの無線用の小型記録システムを開発。
- Neuralynx社は５人のエンジニアのほか、動物実験担当Animal Technician、技術営業、ハードウェア専門エンジニア、ソフトウェアプログラマーを擁する。
- システム購入者、利用者のための２日間のトレーニングコースもある。

4.2. カリフォルニア工科大学（ロサンゼルス）

米国において侵襲型BMI研究をリードする第一世代研究者の一人であるRichard A. Andersen教授を訪問した。BMI研究開発の初期には運動皮質からの信号による外部機器制御が成功していたが、それとは別の直接運動を指令しない頭頂葉皮質領域、前運動皮質領域からの「運動を意図する」指令によって外部機器を制御することに、彼の研究室では世界で初めて成功している。

Richard A. Andersen

- 現在、身体の麻痺を有する退役軍人の自立支援、業務復帰支援のための研究でDARPAによるファンドを受けており、27自由度のロボットアームを制御できるBMIシステムの開発に取り組んでいる。同実験のために、バーチャルリアリティのロボットアーム制御の可能性も検討中である。
- DARPAファンドによりヒトを対象としたロボットアーム研究を進めているが、これは軍事のためではなく、ヒトのQOL向上を目指したものである。
- 手の運動軌道の復号化、頭頂葉皮質の内部モデル等をサルの主なプロジェクトとしており、より少ない数の神経細胞活動（６－10個）でより効率的な運動の再構築を目指している。
- 使用しているのはPlexon 96 array Caltech Customized電極、MatLabで解析をおこなっている。タスク制御にはLabViewを用いている。
- Plexon製品を選んだ理由はカスタマイズのしやすさとハードウェアの性能がよいことである。
- Plexon製品の問題点はSpike Sortingの後、2ch分のシグナルしか出力できなかったことだが、現在は改善されて一つのボードにつき、4ch分、最大16ch分までを出力可能な出力ボードカードが作られている。
- ユニット電極記録によるデコーディングでは、一週間程度でサルは手を動かさずに神経細胞の活動だけでカーソルをうまくターゲットに向けて移動することが可能になる。
- 小型埋め込み型電極（Silicon Array）も開発中である。
- 局所電場電位（LFP）に関しては、パワースペクトルの計算によるデコーディングを試行中である。現在、１本の電極から相対する２方向のターゲットへの運動軌跡をデコードするに足るLFPが記録できている。
- LFPの利点は電極の劣化の影響を受けにくく、より広範囲の信号を捉えることができることである。
- ５年後には下腿部への機能的電気刺激（FES）が可能なBMI/BCI研究に着手したい。
- 全米で脊椎損傷者は200万人以上、上腕部を失った人は25万人以上いる。７～10年以内にこれらの人たちのためにも神経義肢が市場に出回るようにしたいし実現可能であると考えている。
- Caltechでは2004年から神経義肢の研究に取り組んでおり、2008年には臨床応用を目指したヒトへの埋め込み型BMIの研究を始める計画である（2007年中にFDAの認可を受ける予定）。その前段階として、脊椎損傷患者の人たちに神経義肢に関しての意識調査を行う予定である。
- 運動出力用BMIに関する皮下埋め込み型のワイヤレスシステム（電極とコネクター）はまだ市場に出回っておらず、これを開発中である。
- ヒトの皮質内電極埋め込み手術の円滑かつ正確な遂行のために、fMRIによってヒト

の脳の機能マップを汎化するプロジェクトも進行中である。主に運動の実行中と想起中の両方に活動する部位、想起中のみに活動する部位の特定を目指している。

- ジョイスティックによるカーソル操作を脳で代替することに成功した。MicroProbe社と協力して独自電極の開発にも取り組んでいる。

Caltech Brain Imaging Center（CBIC）

Richard A. Andersen研究室が、サルの行動や判断に関わる脳機能解析に使用。学内で共通に使用できる基礎実験のために特化させたヒト、サル、小型動物専用など計4基のMRI装置を持ち、うち一つは縦型である。特に縦型の利用については、イメージングセンター（CBIC）の技術職員とAndersen研究室が連携し、MRIを用いた行動実験に応じた動物用実験機器開発も行っている。

Bruker 4.7T
縦型、椅子に腰掛けた体勢のサルを用いた実験が可能。ウェアラブルモニターを用いてMRI計測時のサルに画像情報を提供し、様々なタスクを行っているサルの脳活動を計測している。
http://magnet.caltech.edu/index.php

4.3. ワシントン大学（シアトル）

Yoky Matsuoka

実際の人間の手の解剖学的特性を精巧に再現した指運動を行うロボットの開発を行っている。指の剛性制御機構の解明を通してロボットハンドの制御機能の向上（Stiffness制御の最適化）を目指している。

- 高性能のロボットハンドの作成により手を動かしているヒトの神経系の基本理解を進め、BMIのテストプラットホームを作ることを目指している。
- ヒトBMIテストプラットホームに先駆けて、現在ピッツバーグ大学のAndrew Schwartz研究室との共同研究を進めており、サルBMIによるより精緻なロボットハンド制御機構の開発に取り組んでいる。しかし、Andrew研究室のようにキネマティクスの情報だけによる制御では限界があるので、ロボットハンド側の自律的な制御も考慮に入れていきたいと考えている。
- 市販のロボットハンドは２自由度が可能なもので２万ドル程度が相場であり、より安価で高性能なものの開発を急ぎたいと考えている。性能としては、具体的に「軽い」、「神経系への接続が容易」の二点に集約される。
- 30年後にはヒトの脳への侵襲性を伴う神経義肢も実用化できるのではないか。
- DARPAからは19自由度のロボットハンド開発のファンドを取得している。当初はロボットハンド側の自律性（人工知能による制御）の比重を多くし、徐々に神経からの信号制御の比重を多くさせて、神経系と人工知能の速やかな協調メカニズムを構築していく予定である。
- その他、NIH R01グラント、R21（発展途上の研究にあてた２年間のグラント）を取得している。
- 日本ではアメリカに比べて最終的に『製品』としての完成品を作り上げるモノつくりの伝統がある。ぜひBMI研究開発にも活発に参入してほしい。

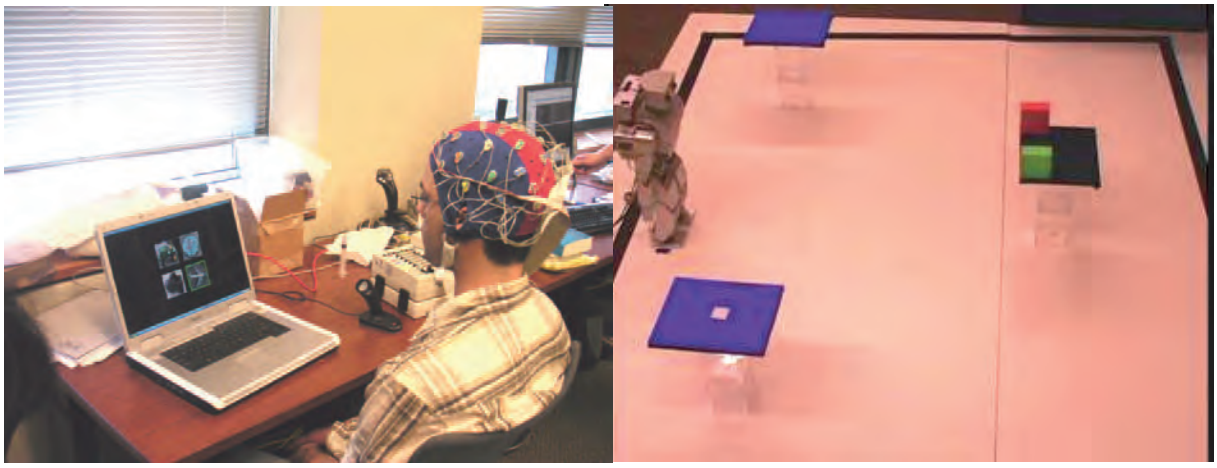
Rajesh Rao

工学系研究者で、脳波を用いたBMI技術開発を行っており、ヒト型ロボットの脳波によるコントロールを発表しているところがユニークである。現在のところ脳から得られる情

報は限られているが、ロボット側に自律性を持たせることにより実社会で活用できるものを作製したいと考えているところに特徴がある。

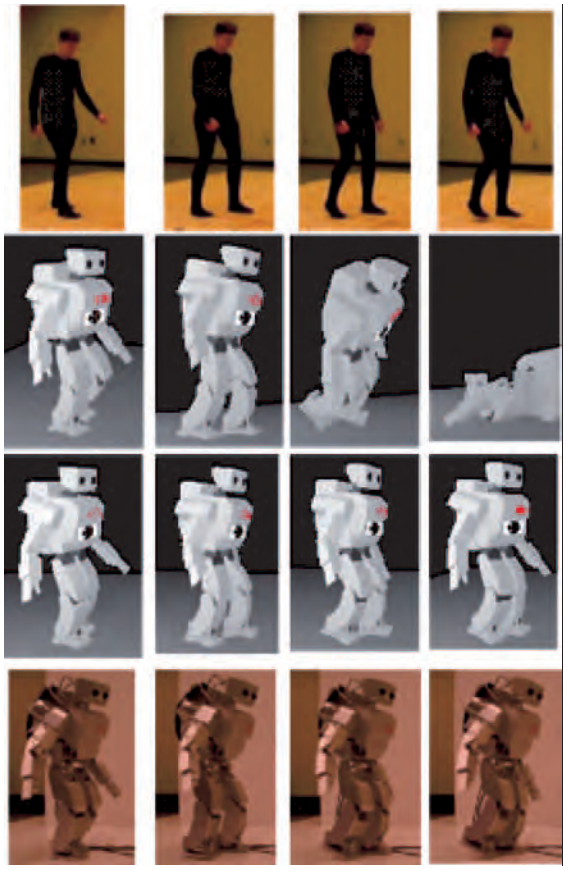
　また、脳波を用いた非侵襲型BMIとは別に、脳外科医との共同研究からヒトでの侵襲的なBMI研究開発も進めている。

- EEG-based BCIによる人型ロボットのコントロールをメインテーマのひとつにしている。
- EEG-based BCIでは、現在32チャンネル（2500ドル）の脳波計を用いて、富士通の小型ヒューマノイド（Fujitsu HOAP2、全身で25自由度）の制御（ワークスペース内での歩行、物体の拾い上げ、運搬、目的地点への設置）のスイッチ（選択肢、判断に関係した信号）としてP300を用いる研究をしている。



http://neural.cs.washington.edu/

- オフラインで記録した脳活動でCGロボットの歩行制御のシミュレーションを繰り返し、精度があがったところで実際のロボット（Fujitsu製）の制御を行う方法で研究を進めている。



- 現在はロボットの自律性に多くを依存した形のBCIだが、徐々に脳波による制御への依存度を高めていく形に性能を変えていきたい。そのためには模倣学習が重要である。
- 上記の点において、フレーム問題の解決や、行動の最適化のために、日本の川人光男先生たち（ATR）の唱えている内部モデル仮説は非常に重要だと考えている。
- 全ての市販ロボットに汎用化できるBCIシステム開発を目指している。具体的にはドアノブを回したり、物を遠くからピックアップしてきたりする「お手伝いロボット」システムの市販化が最終的な目標である。
- 「お手伝いロボット」システムの市販化のためには、できるだけ安価で入手がしやすく高性能のヒューマノイドロボットを未だに探している。その点で、日本のロボット産業とのコラボレーションは大いに期待しているし、共同研究先（特に、power-harvesting、チップ開発、ワイヤレスBCI、記録・刺激双方向型BCI）はすぐにでも紹介してほしいくらいだ。
- 侵襲型では、次のJeffery G. Ojemann博士との共同研究で、てんかん患者の硬膜下に留置されたグリッド上の平型多電極から記録した信号で手の開閉状態をリアルタイムで推測するシステムなどを開発している。

Jeffery G. Ojemann, M.D.

脳外科医であり、重度のてんかん患者の脳の一部を切除する手術を行う前に、硬膜下にEcoG電極を留置した患者の協力を得て、コンピュータモニタ上のカーソル操作を行うBMI技術を開発している。

- シアトルのHarbor View Medical Centerにおいて麻痺を起こしていない被験者（てんかん患者：epilepsy）によるBMI研究プロジェクを実施している。
- ECoG-based BMI開発において、カーソルコントロール段階にまで達している。
- ECoG-based BCIは、現在、64個の電極の挙動をリアルタイムで記録できるシステムを持っており、機能マップ用パッケージ（電極・処理装置内臓PC・汎用プログラムソフト）をつくり、ソフトウェアはJ. Neuroscience Methodに発表して、現在市販している。
- ECoG-based BCIのサンプリングレートは80-120 Hz、1次元(上下方向)へのカーソル制御のデコーディングを行っており、現在2次元の制御に取り組んでいる。EEGとECoG双方でBCI研究をおこない、その性能を比較していく手法を推奨している。

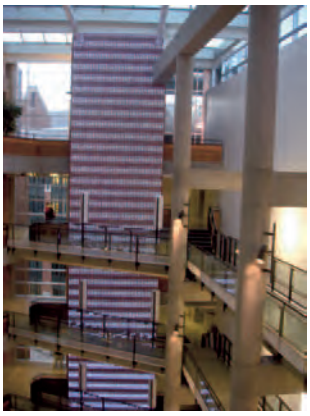
Matthew O'Donnell

ワシントン大学の工学部長。ミシガン大学のバイオエンジニアリング部門のHeadであったが、最近こちらに引き抜かれてきた。ミシガンではシリコン電極などの開発研究推進にも携わった経験をもつ。

ニューロエンジニアリングはQOLの向上を強く目指すものであり、他のバイオエンジニアリングとは異なる性格を持っていると考えている。大学組織としての研究の方向性として、やるべきこと（非侵襲BMI）とやらないこと（電極開発）を明確に位置づけている。

- バイオエンジニアリングというのは大きなテーマ（例、ナノテクノロジー、バイオサイエンス、バイオマテリアルなど）を含んでいる。ニューロエンジニアリングもそのひとつのカテゴリーとして位置づけている。
- バイオエンジニアリングでは広義のヒューマン・コンピュータ・インターフェース（Human-Computer Interface）の構築のために、応用科学研究に重点をおき、既存学部との差別化を図っている。そのため、IRBも独自に設置しているが、実際の倫理審査は共同研究を実施することが多い医学部のIRBと研究内容によってシェアしていることが多い。生命倫理教育そのものはカリキュラムに含まれてはいない。時折セミナーなどオープンな勉強会を実施している。
- ニューロエンジニアリングは他のバイオエンジニアリング領域とちょっと離れている部分があると個人的には思っている。２つの要素（脳の理論的理解とQOL向上のための実践的応用）を兼ね備えたテーマを対象にしているからである。
- ワシントン大学におけるニューロエンジニアリングの特色は
  １．電極開発はしない。（既存のミシガン、ユタのものを使用）
  ２．非侵襲型BMIを重視する。
  ３．リアルタイムコントロール型BMI開発を進め、より実践的な現場において世界をリードするという目標を設定している。
  ４．コンピュテーション（人工知能）にも力を入れている。
  ５．上記の観点からベンチャービジネスも含めた産学連携を推奨している。
  ６．大学内の既存の研究部門（医学部や工学部）との連携によるBMI研究をまず重視し、国際連携などは、十分なイニシアチブと利益が見込める段階になるまでは自重している。
- 学部として、こういった新規分野の研究を推進するために、学部の部局内グラント（ポスドク２、３人分プラスセットアップ費用相当額）を設け、NIHのR01レベルの大型グラントを獲得するための準備段階の資金を提供できるシステムを持っている。
- その他、知財移転のスペシャリストをスタッフとして配備している。
- 当部門では、退役軍人専門の医療研究施設（Veterans Affairs Medical Center: VA）との連携研究も進めている。BMI研究開発に関しては、まず身体に麻痺を有するの人々が恩恵をうけることになるだろう。VAには一般社会よりも高い割合で身体に麻痺を有するの人々が多く、安定した環境で研究を推進できることが、連携を進めている理由である。
- 産学連携でいうと、シアトル近辺には、ボーイング、マイクロソフト、アドビ、バイオテクなど大企業が多く、提携において「地の利」があると考えている。BMI研究は、マイクロソフトの創業者の一人であるPaul G. Allenの寄付によるセンターで実施されている。

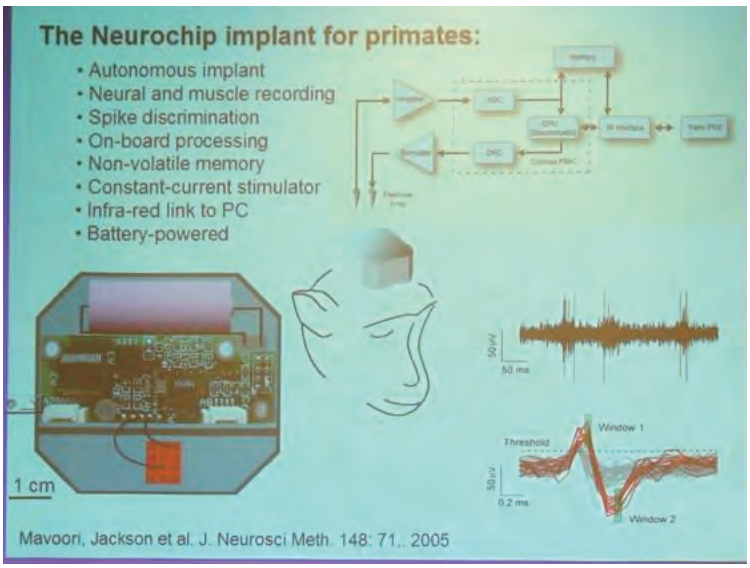
Paul G. Allen Center
for Computer Science & Engineering



Eberhard E. Fetz

サルが意識的に特定の単一細胞の活動の大きさをコントロールできるニューロフィードバックシステムを世界で初めて開発した、BMIの研究開発にとってパイオニア的な研究者である。現在でも、独自のデバイス（Neurochip）を開発して、フィードバックシステムによる皮質内回路の強化実験等を継続している。

- 単一神経細胞より検出した活動電位を信号にしてモーターを動かす実験に成功したという、現在のBMI/BCI研究の原点ともいえる論文を1969年に既に発表している。（Science, 163, 955-958, 1969）
- また、1973年には神経義肢の可能性を示唆する一次運動野の神経細胞の独立制御系に関する論文（J. Neurophysiol. 36, 179-204, 1973）も発表した。
- それらの研究から単一神経細胞レベルのバイオフィードバックトレーニングの可能性と機能メカニズムの構築を目指した研究を展開し、Dr. Andrew Jacksonの一連の仕事（Nature 2006, J. Neurophysiol. 2007）につながっている。
- Neurochipという、バイオフィードバックトレーニング用に開発したアンプと信号処理回路内蔵型電極（J. Neuroscience Method 2005）を開発。回路と外部PCの接続により、脳にインプラントした後も内部プログラムを改変し、信号の検出や外部出力の設定が変更可能である。

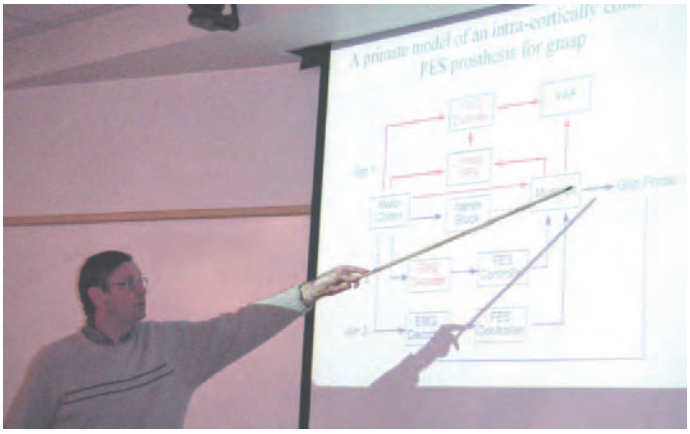


- 彼らが進めているサル大脳皮質におけるNeurochipを用いたバイオフィードバックトレーニングは、最終的にヒトのリハビリテーションに応用できると考えている。
- ヒトへの応用のために、次世代型の恒久的使用に耐えうるNeurochipの開発を進めていきたい。バッテリーの強化、チャンネル数の増加、ということが具体的な課題である。
- Neurochipの開発にはElectronics Computationの専攻の大学院生と神経生理のポスドクの２名とで取り組んできた。ある程度の専門性を備えた人材をうまく連携させれば、大人数で多額の予算を使わなくとも、性能の高いシステムをつくることはできると自分は思っている。この研究も最初は大学内のInternal Grantでまかない、現在はNIHのR01を獲得したが、年間実質予算は５万ドルほどだ。

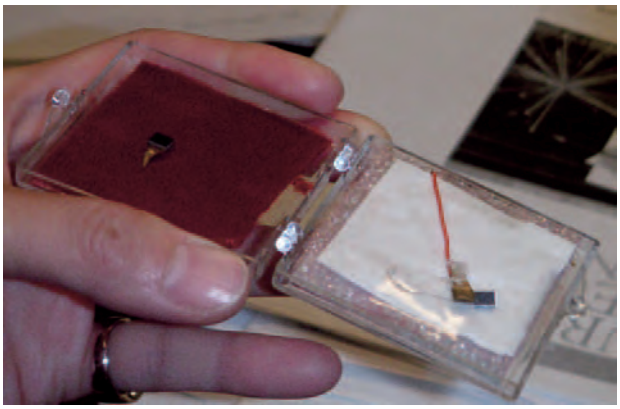
4.4. ノースウエスタン大学（シカゴ）

Lee E. Miller

サルを用いて脳神経活動の多チャンネル記録から機能的電気刺激（FES）による手の動きを実現させた研究者。ロボットアームではなくFESとBMIの連結から、リハビリテーションの観点を強く意識しているように思われる。隣接する病院施設との交流は活発であり、また、FESの一大拠点であるクリーブランド地域との共同研究も精力的に進めている。



- ケースウェスタン大学との共同研究により、機能的電気刺激（FES）を用いたBMI開発に取り組んでいる。具体的には人為的に麻痺を引き起こしたサルに対する機能回復の過程を追っている。
- Cyberkinetics社、Utahの多チャンネル電極によって主に一次運動野、背側運動前野の神経細胞活動から前腕、上腕の筋活動を単一試行ごとに推定、再構築し、それらと実際の筋活動の相関をみるとR^2が0.41-0.7くらいの精度での予測が可能になってきた。
- 信号検出の方法は、100ch arrayのうち、96チャンネルから神経細胞活動を記録し、プラグインの回路によって32チャンネルにセレクトして解析に用いている。



- 人為的に麻痺を引き起こしたサルの研究はもともと1980年代にネコで行っていた技術をサルに応用したもので、皮下にカニューレ、ニードルを挿入し、末梢神経系に神経遮断薬を投与する。この技術により一時的な神経機能遮断が可能になる。
- 末梢神経系の機能を遮断された部位に、リアルタイムで推定した筋電図（EMG）の信号を電気刺激として与えて、実際の筋を収縮させることにより手首の屈曲、伸展をさせることに成功した。
- 次は手の内在筋の刺激による運動再現が目標である。
- サルの脳であれば、ひとつの10*10のアレイで手腕のほとんどの領域をカバーできることが経験的に判ってきているので、事前にICMS等で皮質内電極の装着部位を推定する必要はない。
- 彼らの目標は双方向性（Bidirectional）BMIであり、一次運動野の信号検出→デコーディング→機械、バーチャル対象の制御→それらの人工的なフィードバック→エンコード→一次体性感覚野→一次運動野というループが実社会で機能することを目指している。
- 上記ループの研究にはKINO arm（ロボットアーム）を用い、サルに水平面上での腕の運動課題を行わせ、運動中の一次運動野の神経細胞活動より、位置、速度、加速度、関節トルクを推定し、関節トルクによるBMI制御が可能かどうかを試している。
- また、筋紡錘に圧力トランスデューサーを埋め込んで一次体性感覚野の3a野へのフィードバックを試みている。
- 皮質内微小刺激の周波数（Hz）の高低によって手首の屈曲・伸展を誘発させ、視覚

誘導性の自発的な運動と3aの刺激による手首の運動の潜時を比較すると、一次体性感覚野への刺激が進むにつれて潜時は短縮していく。また一次体性感覚野の刺激による運動では80%くらいの正答率である。

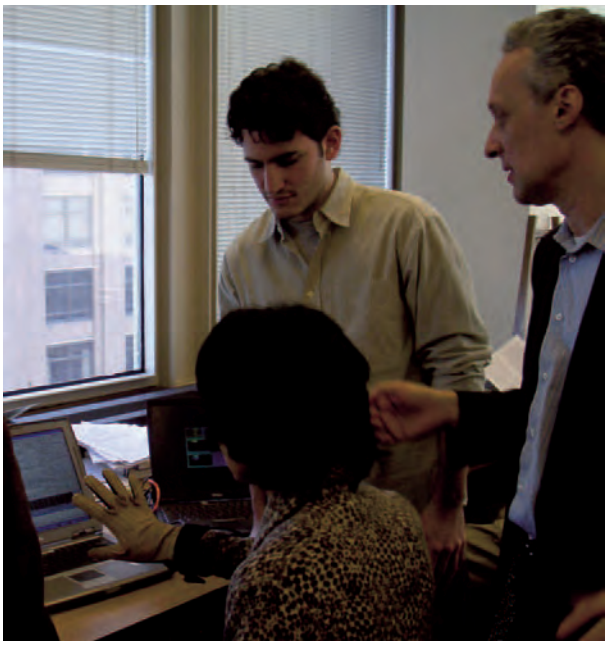
- サルの基礎実験から、ヒトの神経義肢のよりよい制御のための固有受容フィードバックシステムの構築を目指している。時にはラットも用いてよりシンプルなクローズドループの実験を行っている。
- 研究資金としては、NIH R01が主体である。

4.5. シカゴリハビリテーション研究所（シカゴ）

Ferdinando Mussa-Ivaldi

病院内リハビリテーション科において、ハンディキャップのある人でも電動車いすを制御したりする自立支援のための技術の開発を行っている。

- 限られた自由度の手運動の制御により２次元のセンサーマッピングを行い、それを元に車椅子走行の制御実験を進めている。
- 手の他に、身体表面（Cyber Glove、Cyber Shirt）の動きを検出するタイプのセンサーマッピングも開発中。
- それぞれの手袋、シャツは患者の症状に合わせてカスタマイズしている。



Todd Kuiken

神経義肢のパイオニア研究者。

- 筋活動によるロボットアームの制御を行う神経義肢Artificial Armの実用化のための臨床の研究を進めている。
- 欠損した腕に向かう切れた神経を胸の筋肉に繋ぐことによって信号を生体内で増幅後、その信号に基づき、ロボットアームを制御する。
- 日本のテレビでも放送された両腕を欠損した患者を対象にした次世代機を見ることが

できたが、機密保持のため撮影等はＮＧ。

- 二本指から五本指に変更され、指先はソフトな材質が使用されていた。しかしながら、まだ親指以外の指は同時にしか動かすことはできないようであった。

左から、長谷川良平、Ferdinando Mussa-Ivaldi、Lee E. Miller、Todd Kuiken、福士珠美、吉田明（敬称略）

4.6. ノースウエスタン大学（エバンストン）

Dept. Neurobiology and Physiologyは、ノースウェスタン大学のなかでもメインキャンパスのあるEvanston（エヴァンストン市）にあり、シカゴキャンパスの医学部のDept Physiologyと並んで、脳科学研究野中心であるが、さらに他の部門も加えた全20の部門に所属する160人以上の脳科学者とともにNorthwestern University Interdepartmental Neuroscience Program（通称NUIN）を形成している。

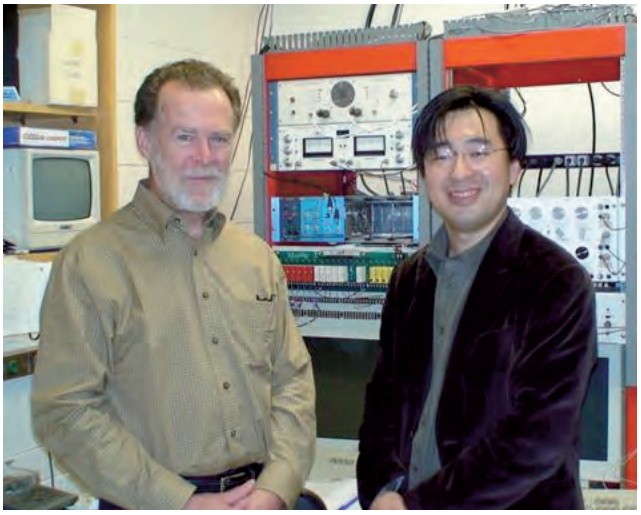
Mark Segraves

視覚情報に基づく眼球運動の制御に関する神経生理学的研究で数々のユニークな業績を持つ中堅研究者。

- 脳が視覚情報に基づいてサッカードと呼ばれる急速眼球運動を行うかを調べるために、行動課題を遂行中のサルの大脳皮質前頭眼野や脳幹上丘からニューロン活動を記録する実験を行ってきた。特に最近の研究において、これまでサッカードのベクトルをコードしていると思われていた上丘のニューロンが眼球位置の情報も同時に表現していることを発見している。
- Dept Psychology所属の心理学者Roger Ratcliff博士（現オハイオ大学教授、ヒトを対象にした心理物理学的研究およびその実験データから構築したDiffusionモデルで有名）と共同で、眼球運動を指標とした二者択一課題における意思決定行動と関係

したニューロン活動の記録実験と、そのデータを平均的な反応時間から予測するモデルを構築する研究が行われている。

- この研究に基づいて、BMIのコア技術である単一試行活動に基づく行動予測に関する研究を行い、眼球運動に関するBMI（眼球ロボットや眼筋に対する機能的電気刺激）が可能であることを、実際のニューロン活動データにもとづき初めて示した（G-TeC参加者の長谷川良平博士との共同研究）。



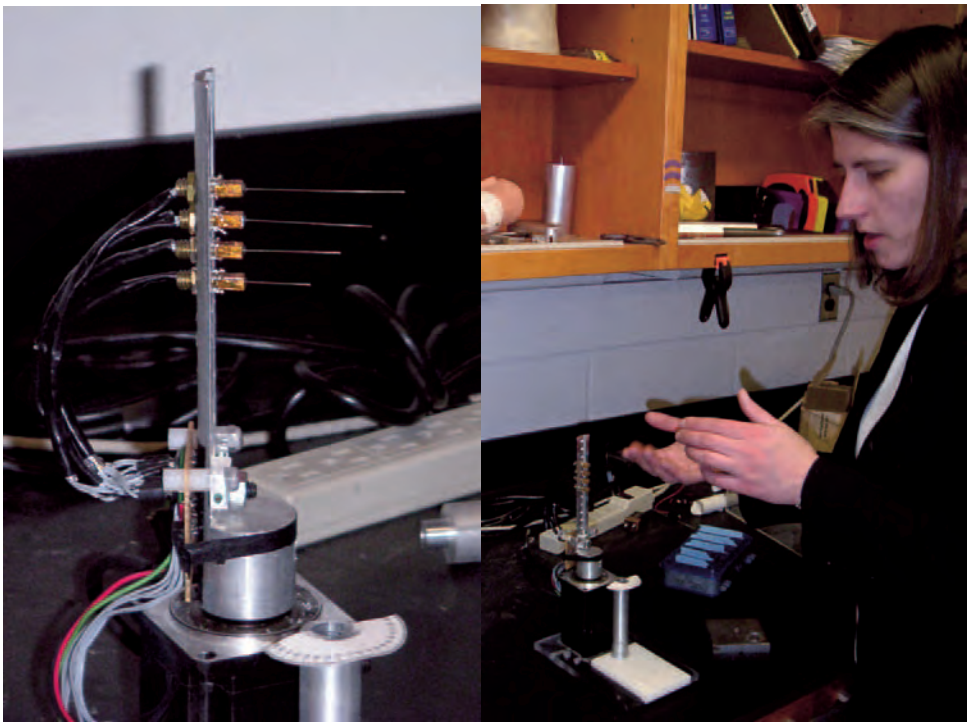
- 自然環境に近い状況での眼球運動制御に関する基礎的脳研究などがメインテーマである。
- 複雑な視覚環境のなかで能動的に眼球運動を繰り返すことによって情報を収集しており、そのような機能は視覚探索と呼ばれている。このような視覚探索の脳内機構を調べるために、写真刺激を用いた疑似自然環境下のなかで、サルに目標物体を見つける課題を訓練し、前頭眼野からニューロン活動を記録する実験を行っている。

Mitra Hartmann

- Hartmann教授は「ヒゲという単純なワイヤー構造がどのような働きをしており、どのような情報を取得可能なのか」ということを、より「直接的」なアプローチによって調べている。
- 例えば、固定したラットの数十本のヒゲの空間配置を厳密に測定し、それらが３次元空間でどのような広がりを持っているかを3D-CGとして表示したり、１本１本のヒゲの弾性を正確に測定することによって、まず、実際のヒゲの様々な物理学的特性を調べる。
- 次に、それに基づいて人工ヒゲを作製した。その装置は縦長の円柱状の構造から、ヒゲに見立てたワイヤーを水平方向に数本縦に配置し、それぞれのワイヤーの根元にひずみセンサーをつけたものである。（次図参照）
- このひげを円柱ごと回転運動させて近くにテスト物体を配置しておくと、人工ヒゲがその物体に触れたときに、凸凹具合によって強弱のあるひずみが観察される。この人工ヒゲを様々な物体に対してテストしてモデル式を立てることよって、未知の物体に

対しても、高い精度でその物体の凹凸を再現できることを示した。

- さらに彼女は、現在、実際のラットを被験体にしてヒゲによる３次元物体の識別課題を訓練し、その時のニューロン活動を記録して、人工ヒゲによって予測されたモデルが実際の脳内情報処理でも使われているかを検証する実験を行っている。
- 外部センサーの情報をそのまま脳に伝えるのではなく、そのセンサー自身に「知性」を持たせる（情報の前処理を行わせる）という発想は、もし、この装置がBMIに適用された場合に、脳に伝える信号の量を圧縮し、脳側の処理の負荷を軽減できる可能性を秘めている。



4.7. クリーブランド機能的電気刺激センター（クリーブランド）

クリーブランドは、機能的電気刺激（Functional Electric Stimuli：FES）に関する研究拠点となっており、多種多様な研究者がFESというキーワードの下に全米・全世界からこの地に集まり、周辺大学、病院とクリーブランド機能的電気刺激センター（The Cleveland FES Center: FESC）を形成している。FESCは、1）クリーブランド退役軍人医療センター（Louis Stokes Cleveland Department of VA Medical Center）、2）ケースウェスタンリザーブ大学（Case Western Reserve University: CWRU）、3）メトロヘルス医療センター（MetroHealth Medical Center）から構成されている。これらの機関を中心に、4）クリーブランドクリニック（Cleveland Clinic Foundation）など約20の機関が連携しており、科学者、技術者、臨床医が協力することで、基礎科学や工学の成果が即臨床現場へ応用される体制ができている。

http://fescenter.case.edu/

4.7.1　クリーブランドクリニック（Cleveland Clinic Foundation）

http://www.clevelandclinic.org/

FESやDBS研究の短期的な目標は、電極技術を向上させて、小型化し、生体適合性を高めることである。パルス幅や周波数、電圧や電極形状と配置など、パラメータが多く、どのような刺激が効果的であるかについて、さらに研究を進める必要がある。長期的な展望としては、刺激の影響をモニタリングし、オープンループ（脳から機械への運動司令が開ループ）のシステムからクローズドループ（脳から機械への運動司令だけでなく、機械の出力結果を脳に入力する経路ももつ閉ループ）のシステムにしていくことが課題である。また、DBSは、パーキンソン病の症状の緩和だけでなく、うつ病への応用が進められている。皮質―大脳基底核連関の仕組みを明らかにする必要があることから、脳機能イメージングや放射線の研究グループとの共同研究が進められている。

Cameron C. McIntyre

深部脳刺激、機能的電気刺激のプロジェクトに携わる計算論学者。

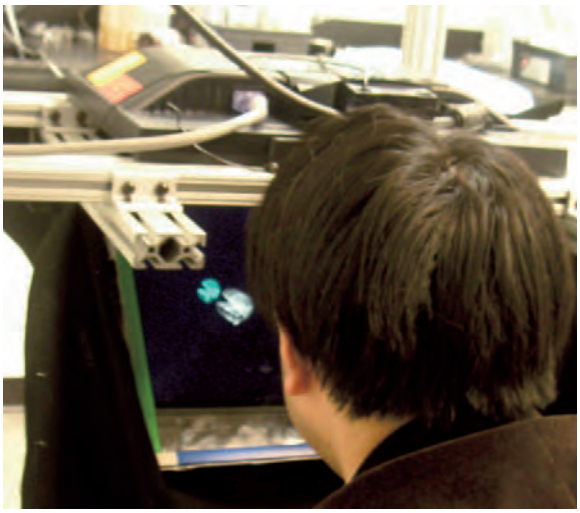
- 臨床外科医やサルの研究者との共同研究で、電気刺激の及ぶ範囲や影響の仕方に関してモデルを構築している。
- BMIの臨床応用はまだまだ100%実現しているとは言えない。もっともっと医療機器と融合していく必要があると考えており、この観点からDBSとBMIの融合をテーマに研究している。
- 今はミシガンシリコン電極を用いているが、ヒトに装着可能な耐久性のよい電極開発が課題である。

4.7.2　ケースウエスタンリザーブ大学

Dawn M. Taylor

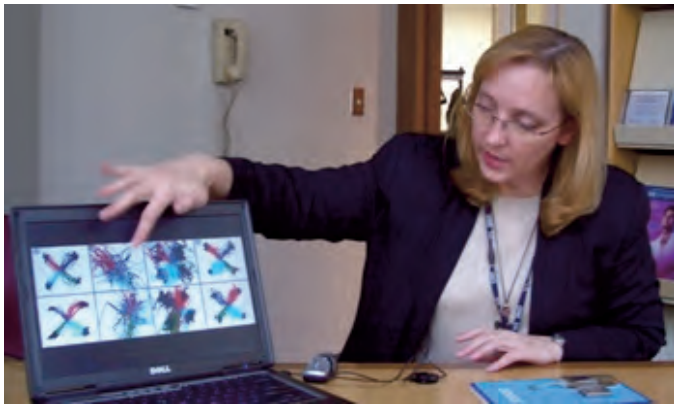
サルMPTPモデルによるDBSのパーキンソン病改善作用機序の解明、そしてDBSのヒトへの臨床応用を二大テーマとして研究を展開している。

- サルの基礎実験では、皮質―大脳基底核ループの機能理解においてDBSにどのような意義があるのかという問題意識をもっている。
- サルの実験設備としては、急性実験、3Dリーチング課題遂行中のサルのユニットレコーディング設備を有している。電極はミシガンのProbe4*16 arrayを用いている。



- また、Medtronic社製の刺激電極の皮質におけるダメージを調べ、その安全性を証明しつつある。サルは背中に刺激装置が埋め込まれている。
- 臨床応用研究としては、まず、パーキンソン病の症状とDBSの効果（深さ、電流の強さ等と症状の改善度）の定量化を試みている。この成果をもとに、別の症状（躁鬱）や脳部位（小脳など）への応用展開も視野にいれている。

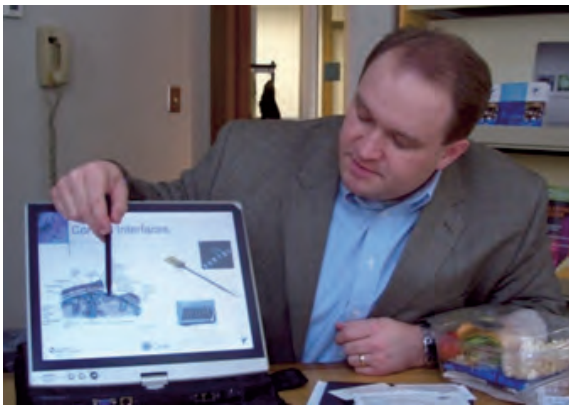
- DBSに関してはNINDSの委託研究によって、既に300人の患者がインプラント手術をうけ、手指の運動機能の回復に取り組んでいる。
- また、NICHDのファンドによって、Cyberkinetics社（Braingate）と自分達の3Dリーチング運動をリンクさせたFESの上腕機能回復における効果の研究を実施している。最終的には刺激装置の開発と商品化が目標。
- タスクはMatLabで制御している。上記プロジェクトの中には双方向型BMIによるオープンループとクローズループによるリーチング運動の軌道再現（制御）の実験も含まれている。クローズドループの方が運動軌道再現精度は高い。
- 現在は6自由度のバーチャルロボットアームの制御実験を行っている。
- 現在の研究資金は以下の3種類。
- 退役軍人研究開発局（VA Office of Research & Development）のメリット・レビュー・プログラム（Merit Review Program）では、Field Potentialの信号検出の効率化のために、３年間で４種類のシステムを試すプロジェクトを実行中。
- NINDSでは無線EMG/EEGセンサーを用いて16チャンネルの脳波計測によるカーソル制御実験を行ったり、治療の一環として脳波誘発性刺激（EEG-triggered Stimulation）実験なども行っている。
- NICHDでは、脊髄損傷モデルのラットに損傷後0、３、６、９ヶ月後からFESによる機能回復実験を行い、FESの開始時期と脊髄損傷からの回復機序の関係をさぐり、損傷後のFES電極を処置する最適な埋め込み時期の推定を行っている。
- モーションキャプチャを用いて腕の位置や手の開き具合を測定する装置を用いて、リーチ＆グラスプ機能のBMIを研究している。
- 同上の記録装置を用いて脳活動によって４つのうちの１つの視覚目標にカーソルを移動させる。閉回路を用いて脳と計算アルゴリズムの両方が学習するシステムとなっている。
- DBSの実験動物モデルを作成し、「治療」下における行動やニューロン活動、電極が周辺組織に及ぼす影響などを調べている。
- ジョイスティックを使って目標の位置にカーソルを移動させる課題をサルに行わせる実験装置を使って、運動計測と脳計測を同時に行い、前運動野における固さ制御がどのように行われているかなどを研究している。



Dustin Tyler

ケースウエスタンリザーブ大学の先進基盤センターの設計と試作の責任者。

- ケースウエスタンリザーブ大学には、クリーブランド退役軍人医療センターと連携して先進基盤センターが組織されている。
- 先進基盤センターでは、マイクロ電気機械システム（Micro Electro Mechanical Systems: MEMS）の設計と製造、神経インタフェース、機能性高分子材料や生体材料開発、ラピッドプロトタイピング、集積回路とソフトウエア設計、システム評価と生産システムの開発までを一貫して行うことができるようになっている。
- 大学で設計と試作を、企業で製造を、病院で評価を担当している。



Jim Buckett

ケースウエスタンリザーブ大学の先進基盤センターの常勤の技官。

- もともとは大学内の研究をサポートするための技術開発を各研究室が個別に負わなくて済むよう全学共同利用できる設備機関として設立された。
- 連邦政府、退役軍人省、オハイオ州、地域政府の四者の共同出資によって賄われている。
- 電気・電子回路設計室、機械工作室、微細加工室、動物実験用手術室と、試作に必要な設備が一通り揃っている。
- 主にFESで用いる挿入電極の開発を行っている（電極名称SPIRAL末梢神経にうまく装着できるように、神経線維にカフ状にかぶせたカバー内の４箇所に接点を設置するという構造）。作業は全て手作業で行っている。

Patrick E. Crago

生体医工学部の学部長。

- ケースウエスタンリザーブ大学における生体医工学教育研究としては、神経工学の他、再生医工学、生体イメージング、生体材料の四つの重点分野があり、これらの分野の研究者が相互に連携しながら進めている。http://bme.cwru.edu/

4.7.3　クリーブランド退役軍人医療センター

退役軍人研究センターにおける卓越した拠点として、2005年１月より、CWRUと連携する先進基盤センター（The Cleveland Advanced Platform Technology Center: APT Center）が組織されている。退役軍人のニーズに技術者や科学者が注目し、新しい技術を退役軍人が障害を克服したり、日常生活機能を高めたりすることに応用できるようにすることを目指して、臨床医と開発者とスタッフが協力してプロジェクトを進めている。
http://www.cleveland.va.gov/
http://www.aptcenter.research.va.gov/

Ronald J. Triolo

- 退役軍人研究開発局とDARPAの違いとしては、退役軍人研究開発局は純粋な医療に関連した研究開発、DARPAは軍事応用のための研究開発、という定義ができるが、共に相補的であると考えている。例えば退役軍人研究開発局での研究成果は退役軍人のQOL向上に役立つほか、DARPAに還元され、戦場における損傷兵士の効果的な治療に使われる。

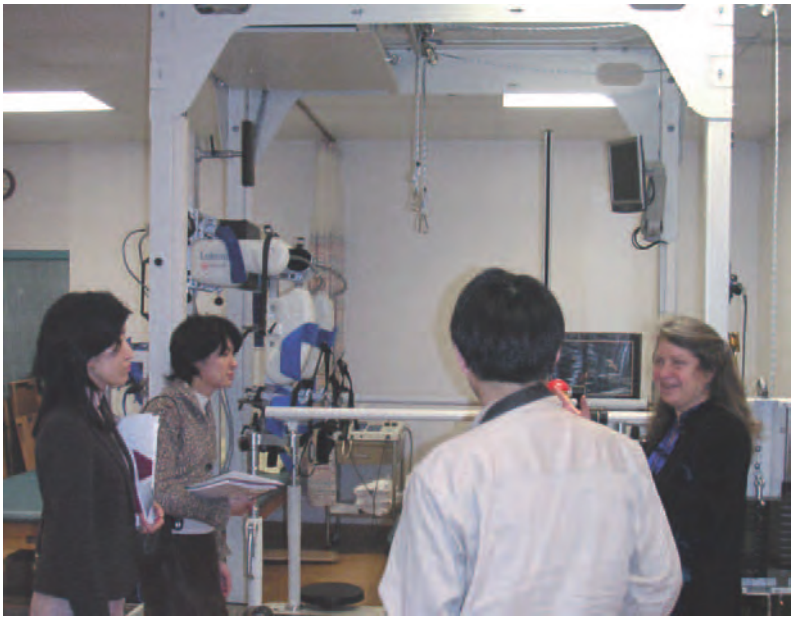
- BMI/BCIに関しては、主にVAで優先的に行われていると考えている。それは、リハビリテーション、神経義肢の開発に主眼がおかれているからである。
- 筋電位を遠隔で計測するための無線電力送受信機のプロトタイプの開発を行っている。
- クリーブランド退役軍人医療センターはダイナミックポリマー研究のCOEとしてNIHからファンドをうけており、アメフラシの結合組織にヒントを得た固さを変えることができる高分子ナノ複合体の開発をおこなっている。
- フラットタイプの神経電極を用いた神経束の一部の神経を選択的に刺激するための計算モデルなどが研究されている。
- クリーブランド退役軍人医療センターのような研究機関にいるデメリットは、大学にも職を得ていないとNIHグラントへの申請が難しくなることである。しかしながら、メリットとしては、若手の研究者にとってはスタートアップのための費用や設備が相対的に容易に得られることが挙げられる。

Janis J. Daly

- ヒトの脳卒中患者を対象に治療の一環としてのFESを用いて、随意的な運動制御の回復支援をしている（神経リハビリテーション）。チームには医療関係者、エンジニア（電気物理学系の研究者も含む）、神経科学の３領域から研究者と理学療法士が参画している。
- NIHのグラントはなくVAの資金のみであり、もっと大きな額のファンドを探している。
- 電極は表面電極と埋め込み型電極を用いており、表面電極による臨床研究の成果はDaly et al., Stroke, 2006において発表した。どちらの電極を用いるかは損傷を受けた部位で異なっており、手腕の場合は表面電極、下腿部なら挿入電極が多い。
- FESの効果としては、概して、腰、股関節、臀部、膝関節、足関節などの可動性を改善し、運動機能の回復と慢性的な痛みの改善がみられ、自力歩行、車の運転、日常生活における自立、といった効果がみられる。できるだけQOLを定量化し、客観的なデータ提供に努めている。

- 挿入電極はテフロンコートのものでFDAの認可が得られるよう、埋め込み後にプールやシャワーによるダメージがないこと等を示す安全性の証明実験を現在実施中。
- FESの臨床研究には理学療法士、セラピスト（治療士）による、患者の症状にあわせた刺激パターンのカスタマイズが必須。臨床筋力検査（医療現場で用いられている筋力の低下を推定する指標）をもとに刺激のパターンを割り出す作業が重要である。
- FESの刺激パターンをソフトウェアとして供給し、カスタマイズしたものを公開し、ダウンロードして各自のコントローラーのマイクロチップに納めるようなシステムを構築している。現在は、挿入電極システムにおいてこのカスタマイズしたシステムによる刺激制御を行っている。
- 一方、手の表面電極のFES刺激パターンは、現在のところ、患者のパフォーマンスに合わせてセラピストがマニュアルで刺激をしている状態である。
- FES刺激を伴うリハビリ訓練にはQOLのスケールである、CHART（Craig Handicap Assessment and Reporting Technique）スケールを用いて効果を計っている。

埋め込み電極を用いた機能的神経・筋刺激（Functional Neuromuscular Stimulation: FNS）による歩行機能回復、表面電極を用いたFNSによる上肢運動機能回復、特に随意運動機能の回復について患者への治療を行い実践的な研究を行っている。歩行訓練プログラムについては、電極を用いなくても、リハビリテーションだけで機能を回復させることも可能であり、条件に応じて治療法を組み合わせている。機能的電気刺激においては、不快にならない閾値の設定が重要である。表面電極を用いたFNSは商品化されているが、埋め込み電極を用いたFNSは研究段階であり、動物実験を経て臨床試験を行っている。ブレインマシンインターフェイスを用いなくても、末梢神経刺激だけでこれまでにかなりの成果を挙げているが、脳波計測により機能的神経刺激の運動系への影響について調べる研究なども行っている。



4.7.4　メトロヘルス医療センター

CWRUとクリーブランドVA医療センターで基礎的な科学技術を開発した後は、メトロヘルス医療センターにおいて臨床試験を行い、社会に普及させるという流れになっている。メトロヘルス医療センターで、臨床試験を行っている整形外科医から、上肢や下肢に埋め込み電極を装着する手術を行った症例の紹介があった。今後、無線電力受信機を胸の部分に埋め込み、そこから上肢や下肢全体に神経電極をネットワークさせたいという将来像が示された。

http://www.metrohealth.org/

Michael W. Keith

John Chae

- 手腕、および下腿部への神経義肢とFESの併用治療の実用化に向けた臨床研究。
- 一部の体肢損傷の場合、対側の健康な体肢の筋活動や運動指標を検出して信号化し病側の筋に刺激を送ることで、運動機能の回復を促進するような技術もある。
- 手の内在筋制御のための神経への刺激電極のインプラント技術も有している。

4.8. ハーバード大学（ボストン）

Joseph F. Rizzo III

Jinghua Chen

Douglas Shire

William A. Drohan

Shawn K. Kelly

ボストン埋め込み型人工網膜プロジェクト（Boston Retinal Implant Project: BPIP）

Dr. Joseph Rizzo（ハーバード大）とDr. John Wyatt（MIT）は、1980年代に、ボストン埋め込み型人工網膜プロジェクトを開始し、20年以上にわたって継続している。当初、マサチューセッツ目・耳診療所、ハーバード大学医学部（Harvard Medical School)、マサチューセッツ工科大学の三者でスタートしたが、その後プロジェクトが成長したため、さらに退役軍人省（Department of Veterans Affairs）の支援を受けて推進している。

Dr. Joseph Rizzoを中心に、プロジェクトを支援しているCornel FacilityとEIC Laboratoryを紹介まずしていただいた。

Cornel Facilityの紹介

- 人工網膜のプロジェクトは規模も予算も小さいが、そのような状態ながら電極開発研究を支えてくれたのが技術ファシリティの供給システム、Cornel Facilityである。NSFなどが出資し25年ほど前に設立された。現在全米に13カ所の施設がある。（National Nanotechnology Infrastructure Network (NNIN)）
- Cornel Facilityでは1時間あたりの施設使用料を払うことで、材料科学、化学系の設備を利用してそれぞれの仕様や目的にかなった実験機器や製品を作成することができる。
- 施設はアメリカだけでなく全世界に公開されており、利用者は専門の教官からまず設備使用の講習（安全管理を含む）をうけて、サポートテクニシャンのアドバイスと安全管理（監視）をうけながらも、原則自力でモノを作る。この制度下で25年間無事故である。

- このファシリティ施設自体にはIRB的組織はない。しかし、利用者が所属する研究機関において倫理審査を通過した、あるいはFDAが認可した研究のための機材作成目的の利用しか認めないことで、その信頼性を担保している。
- この施設を利用することでは研究内容の秘匿性を保つのが難しいのは欠点かもしれない。

EIC Laboratoryの紹介

- 比較的小規模のR&Dを手がけており、NIHの小規模ビジネス設立援助資金をうけている。
- 開発された試作品に関して仮説検証型の実験をおこない、そのデータをもとに商品化のライセンス、特許などをとるのが業務内容である。
- 社員数は35名（Lab bench researcher、Technicianなど）、コンサルティングそのものに特化した人材の設置や業務はおこなっていない。

Cornel FacilityとEIC Laboratoryの紹介の後、次に、人工網膜研究開発を中心とした入力型BMIに関する現状と問題点、将来的な展望等をうかがった。

人工網膜の開発におけるボトルネック

- 動物の眼球を用いた実験のための眼科手術のスキル向上が課題である。また、ヒトの眼科手術は結構難しく、動物で上達したからといってスキル向上にダイレクトにつながらないこともある。
- 安全性の検証実験が困難なことが多く、なかなかFDAの認可申請にこぎつけることができない（10年間などの長期の安全性検査データを提出することが困難）
- 技術的な問題としては、網膜チップのための安定しかつ微小な電源の確保が困難である。また、盲患者の視神経、皮質の刺激を閾値以上に持っていくには、健常な視覚機能をもつヒトの数倍以上の強度の電気刺激が必要だが、その刺激を与えることでの網膜の物理的な刺激による損傷などが問題になる。
- 生体内に設置するので、回路の安定性確保と微小化も大きな課題。
- 上記のような問題を解決するため研究開発チームは一体となって作業にあたる。エンジニアも必ず手術に立ち会い、現場の問題を共有し、議論によって技術的な解決の道筋をさぐっている。

人工網膜研究開発の現状

- 昔はアメリカが独走していたが、日本とドイツの参入により競争が激化してきたと感じている。
- Rizzo研究室は20年以上にわたって開発を手がけているが、1980年代は一定のファンドを維持するのがとても大変だった。通常獲得できたNIHやNSFのファンドは２－３年のサイクルのものが多く、長期的な視点からの開発が必要な研究には向いていない。にもかかわらず、ファンドの多くが臨床的な到達点（実用化、治療法の確立）を求めるということが問題である。
- 現在でも、次世代デバイス開発にお金はつくが、既存のデバイスの安全性の検証のた

めの実験にはお金がつきにくい。人工網膜の実用化には学術研究とは異なったプライオリティがあるという側面が理解されにくい。

- アメリカの場合設備には研究費がつくが、領域を形成することには研究費がつきにくい。対照的に、ドイツの場合は、領域を形成することに研究費がつく。このため、後発であっても研究領域が早く形成される。
- 最近の大きな財源はハワード・ヒューズ財団である。
- W.M. Keck Foundationも最近は人工網膜研究に注目している。
- 中国でも３年前から人工視覚の研究開発プロジェクトが立ち上がった。現在、北京、上海に研究所がある。
- 中国の北京大学から、埋め込み手術を学ぶため、2004年より女性の医者（Dr. Jinghua Chen）がポスドクで来ている。中国では､2003年から2004年にかけて、人工網膜に関する研究プロジェクトがスタートし、2004年からさらに３年の研究費を獲得できたので、BRIPに来ている。北京と上海でコラボレーションしながら進めているという。

人工網膜研究開発の今後の課題と展望

- 先述したような技術開発上の問題はまだ続くだろう。特にワイヤレス化と電極の数を増やすことが当面の課題である。
- 電力受信機つき無線電極を開発している。これをたくさんの領野に埋め込んで同時記録することで、脳神経活動を大域的かつ詳細に調べることができるようになる。
- 空間解像度が低いことが問題である。コントラストを上げようとすると電極を小さくして個別のチャネルを刺激する必要があるが、電極を小さくすると電圧を高くする必要があり、その結果局所的に電流密度が高くなり化学反応が起こって組織を痛めてしまうという問題がある。これは人工網膜だけでなく神経電極刺激に共通する問題である。
- 現在の手法だと、色は白、黄色、虹色のいずれかが見えるという。理論的には色を見えるようにすることも可能である。実際には、色が見えるようにするよりも前にするべきこと、すなわち、もっと解像度を上げることの方が重要ということである。
- 末梢神経や脊髄の方が、網膜よりもスペースがあって埋め込みが容易である。デバイスの開発も重要であるが、埋め込み手術の技術も同様に重要である。末梢神経の埋め込み電極は、網膜などの中枢神経の埋め込み電極に比べてそれほど洗練されていない。このため、中枢神経で開発する技術は、他の部位へも展開することができる。
- 人工網膜の装着手術のスキルをもった医師の養成も重要。数箇所の病院でエキスパートを養成できるようなシステムを作りたい。
- プロジェクトも研究フェーズのうちはよいが、開発フェーズ、実用化フェーズへと進むにつれて、研究費獲得が困難になる。一方、必要な費用は増加する。このような段階になってくると、ベンチャーキャピタル（Venture Capital: VC）の活用が有効である。しかし、１、２年のうちに実用化の見通しが立たないとVCはストップして

しまうという問題がある。

- 実用化に成功した時に量産してくれる企業が見つけられるかが不安だ、ベンチャーだけでは市場ビジネスとしては成り立たないので、それが今後の課題。
- ソフトウェア開発とデザイン担当のエンジニアが不足している。
- 異分野や異種機関の連携をうまくコーディネイトしてくれるような担当部署設置のための資金がなかなか確保できない、こういった類の人材の育成や確保が今後の課題である。

BMI研究全般における将来像

- DBSなどに代表されるBMI技術は非常に有望であると思われる。
- 末梢神経系（感覚入力）への電気刺激もより洗練された手法が必要だろう。特に、人工網膜上の個々の入力チャンネルを独立に制御できる技術の確立は、効率的な信号検出、電流・電圧の適切な制御のためにも重要である。
- 現行の技術では、実は色識別の感度が未成熟でほとんど白黒の世界である、この問題も克服すべき課題だ。
- 「走り出す前にまず歩け」をモットーにこれからも着実・堅実な研究開発に取り組んでいきたい。

日本に向けてのアドバイス

- 視覚系の神経科学者へのファンドは必須である。
- 研究プロジェクトを立ち上げた当初の10－15年と言うのは先達とのコラボレーションをもった方が結果的に得策ではないだろうか。
- アメリカから学べることはどんどん学んでほしい。そして、学んできた人間自らが研究開発の戦略をたてて取り組むことが重要だ、そうすれば成功への道筋は開けてくるだろう。
- これまで挑戦してこなかった技術課題に取り組むのであれば、これから新しく開始する研究拠点と連携してこれまで開発した技術を伝え、新しく開発される技術を取り入れるWin-Winの関係の研究協力が可能になると考えているという。しかし、研究拠点はそれぞれ他と差別化しなければならないため、このような連携はこれまでに実現したことがない。このため、新しく開始するところはゼロからのスタートとなり非常に効率が悪い。また、うまくいかないと分かっていることに取り組んで失敗する例もある。
- アメリカには、非常に優れた研究拠点がいくつもある。一方、競争が激しいため異なる拠点同士の連携はあまり行われておらず、その点においては効率的でない。日本は国土が小さいので、拠点同士がお互いの利点を生かした連携を行うことで、研究を効果的に進めることができるのではないか。

4.9. マサチューセッツ工科大学（ボストン）

Ann M. Graybiel

市販の金属電極を大量に埋め込む記録システム（電極可動部等は独自開発）で、効率よく高次脳機能関連データを取得することで有名。

- BMI/BCIそのものの開発を直接的に取り組んではいないが、多チャンネル電極による神経細胞活動記録を用いた認知判断、眼球運動軌跡、感情的ジレンマなどのデコーディング研究を行っている。
- Eye-Hand mental mapping（Joystick課題）を120-128 ch電極を用いた記録実験を行っている（タスク制御Delphi記録システムNeuroLynx 解析Matlab）。
- 電極は40*40 mm 1mm間隔で最大160本刺入可能であり、学内の機器工作室で作っているカスタムメイドである。
- 慢性埋め込み（96電極）によるによるSequential Habituation、Self-sequence Constructionの神経機構プロジェクト
- 感情的葛藤を伴う行動課題遂行中のサルの情動系皮質の機能役割を解析している。
- ヒトへの侵襲性を伴うBMI技術の実現はまだまだ早すぎると思うが、１%でもそれを望むヒトがいるのであれば、技術開発に取り組む価値はあると思う。QOLというのは時として最も重要なファクターとなるし、ニューロエンジニアリングには『希望を持たせる仕事』という意義があるだろう。
- 日本には優れた神経科学者や計算論の研究者が沢山いるので、潜在的にはアメリカに遅れをとっているとは思えない。

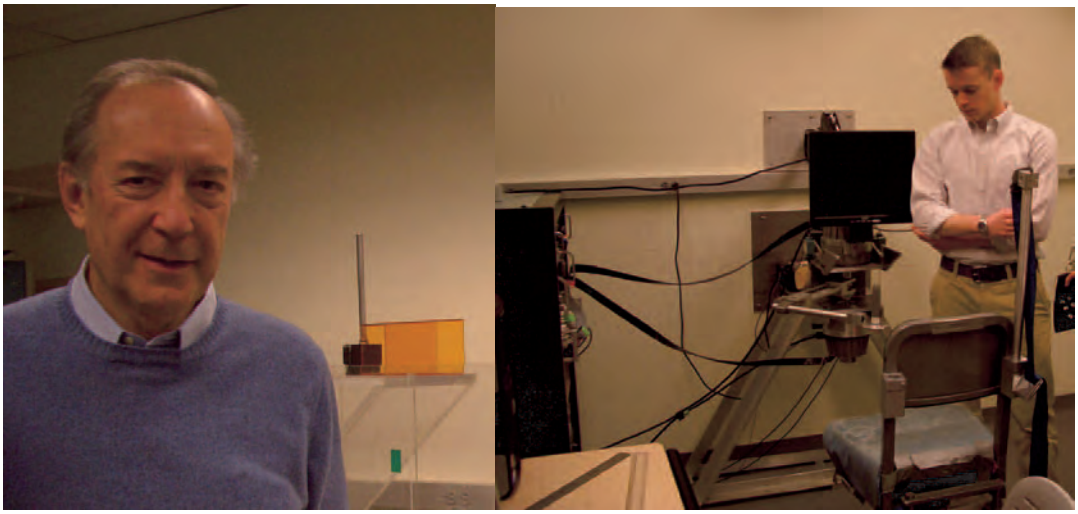
Emilio Bizzi

腕の運動制御とその学習機構に関する研究の権威。

- BMI/BCIそのものの開発を直接的に取り組んではいないが、霊長類における運動制御の基礎研究においては伝統があり、運動学習における一次運動野、補足運動野の機

能役割に関しては神経細胞レベルだけでなく、Local Field Potentialの研究を進めている。

- Neuralynx 16chの記録システムを用いて一連の実験を行っている。
- 最近はBMI研究者が着目する局所集合電位（LFP：記録効率が悪い埋め込み電極でもスパイク活動が記録可）からの解析も行っている。LFPのデコーディング研究はまだまだ発展途上だが、現時点のアルゴリズムでは、ポジション（方向）に最もセンシティブである。
- 今まではBMI研究そのものに参入していなかったが、現在内部のグラントによって新素材電極の開発に取り組んでいるので、これから特にLFPによる義肢制御を視野にいれた研究を展開していきたい。



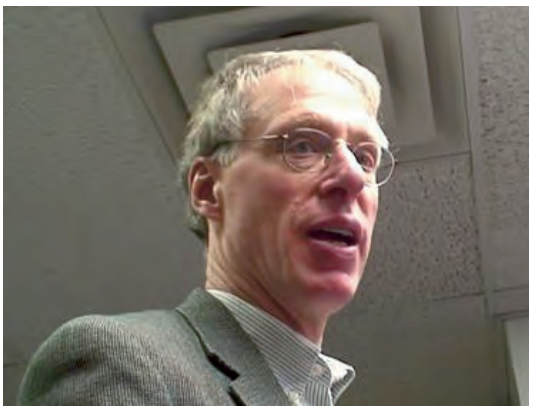
4.10. ニューヨーク州立大学ワドワースセンター（アルバニー）

非侵襲型のBMI研究開発において米国での中心的な役割を担っているのが、Dr. Jonathan R. Wolpawである。BMI全般に関わる国際規模のシンポジウム開催やBMI研究者コミュニティーの育成にも精力的である。また脳波を用いたBMIの市販製品（BCI2000）を開発していることでも有名である。BCI2000に関しては実際の使用風景を健常者によるデモンストレーションで見学した。研究室にはBCI研究の被験者として実験室に来訪する人たちや問い合わせに対応するためのコーディネイターとして、BCIに関する一連の科学的・技術的知識を兼ね備えた専任スタッフがおり、彼女の解説でデモンストレーションの見学と機器の説明の補足をうけた。

http://neurophilosophy.wordpress.com/2006/10/11/playing-space-invaders-is-all-in-the-mind/

Jonathan R. Wolpaw

- 臨床および家庭用に汎用性の高いBMIの開発を主にしており、それを支えるための電極の素材と形状の改善、電極刺入による皮質ダメージを軽減するための生化学的、電気生理学的研究を同センター内のKaren研究室と共同（BIRDプロジェクト）で行っている。



- ラットを用いて電極の耐久性を左右する重要な要素であるミクログリアの組織反応の追跡実験（刺入後５分から１週間）を行い、今までに２種類の薬品が変性の予防に効果があることを明らかにしている。
- 適切な電極の刺入を効率的に行ってラットにおける多チャンネル電極装着実験を効率化するための、Focal point（個体間に共通に体肢の再現部位に相当する皮質表面）のマップを構築している。
- ポリマー電極を刺入する前後の皮質組織の免疫反応に関して電極の形状と刺入速度の２要因の影響を調べ、電極の太さと刺入速度の複合要因の影響のほか、同じ形状であれば、刺入速度の速さと周辺組織の死滅数に有意な相関関係が見られる。電極は全般的にゆっくり刺入したほうがよい。また、誤って血管をヒットしないようにしなくてはならない。
- 潜在的なBCI利用者層として自分達が想定しているのは種々の脳神経疾患（脳性麻痺、脳幹以外の脳組織の梗塞、脳幹部の梗塞、ALS、筋ジストロフィー、ポリオ等）、脊髄損傷等をトータルするとかなりの数になる。
- ピアレビューにおいてBCIが本格的に登場するのは1990年代
- 64チャンネルの脳波計によってオンラインにトレーニングが可能なBCIに関しては1988年にDonchinらが発表した（P300 Speller）
- 脳波の分析にもいくつか違いがあり、皮質電位P300と運動感覚野の事象関連律動変化の二つが主流である。
- 利用者のバイオフィードバックトレーニングの過程は、１次元のカーソル運動の制御を獲得後、約20時間の追加トレーニングによって２次元のカーソル運動制御能力を獲得できる。垂直方向と水平方向で別々の脳波の周波数（垂直は24Hz、水平は12Hzなど）を使い分けることで制御系を独立的に動かしているようだ。信号源は64チャンネルのうち、感覚運動野に相当する電極からである。
- 現在カーソル制御からロボットアーム制御への移行実験を実施中である。
- 技術的なアーチファクトとして最も大きいのは額関節運動によるノイズである。それを回避するためにフィルターをかけることもある（ラプラス変換など）
- BMIには運動過程そのものの制御を目指すか選択結果のコントロールを目指すか、という違いがあり、それぞれの目的に応じたアルゴリズムの開発が求められると考えて

いる。全般的に現在脳波レベルと神経細胞レベルで制御の精度の度合いに違いはないというのが自分の認識だ。

- 8chのEEGを使った家庭用のBCIシステムを開発している。ノートPCを用いてデータ処理が可能となっている。　BCI2000というBCI用のデータ処理ソフトウェアをソースレベルで無償公開している。日本においても少なくとも７つの機関が使用登録をしている。2007年末に公開予定のバージョン３ではOSとしてWindows、MacOSのみならずLinuxにも対応するようになる予定。ロボットのリアルタイム制御ではWindowsと共にLinuxを用いた制御を行っているグループが多くいるため、これは脳から取り出した信号によってロボットを制御するような場合は注目すべき点である。
- P300によるEEGを使ったBCIシステムのライブデモを行った。使いこなすには訓練と意識の集中が必要なようであるが、訓練を受けた学生は10文字程度の文を５分程度で完成させた。文字の選択は、２次元平面上に並べられたアルファベットの配列から目標とするアルファベットが存在する縦軸、横軸の位置を選択する。
- Wolpaw氏によると一分間に３～４文字程度は選択できるようになるとのこと。身体を動かすことのできない脳卒中やALS患者の方々には非常に有用であると考えられる一方で、健常者が用いるあるいはロボット制御に用いるには、情報を選択する速さと信頼性の面でこのままでの応用は困難であると感じた。非侵襲型のインターフェースのリアルタイム性と信頼性の低さがロボットに応用する場合には問題となりそうだ。
- BCIにおける脳の信号処理のためのパラメータも訓練中に変化させているとのこと。しかし、このパラメータをオンラインで変化させる割合には注意が必要なのではないかと思った。脳とコンピュータが２つとも適応的である場合、系の状態が安定しないケースも十分考えられそうである。将来的には制御理論の研究者との共同研究が必要なのではないかと感じた。
- Sensorimotor cortexにおける24Hzのベータリズムの活動を垂直方向のカーソル制御に、12Hzのミューリズムの活動を水平方向のカーソルの制御に用いて、２次元平面上のカーソル制御を実現している。P300に比べてさらに訓練に時間を要する。被験者が暗くした部屋の中で２次元平面状のカーソルをBCIによって制御している実験を見ることができた。相当な集中力を要するのか、実験中は質問をすることを禁止された。そのような整備された環境での実験とは言え、実際にEEGを用いたBCIでカーソルを巧みに制御できている事実は注目に値する。
- 現在改良に成功している部分はシングルスイッチ（レベル１）から２者択一あるいは複数からの項目選択スイッチ方式へのバージョンアップ、選択画面のデザイン（９分割、８方向リーチングなど）、８チャンネルから64チャンネルへの脳波計のバージョンアップなどである。
- 市販しているBCI2000の価格は８チャンネル脳波計とラップトップコンピュータを含めて4000～5000ドル。Windowsベースである。1994年にプロトタイプがで

きあがり、99年に実用化。2002年には90名の利用者だったが、現在は160名が利用。ちなみにこのプロジェクトのホームページには月に5000アクセスがあり、需要は増えていると感じている。

- 制御用ソフトウェアの入ったパッケージ（Matlab、実験の時にはアスキーファイルでデータを取り出すことができる）は無償で標準型プログラムがダウンロードできるようにしており、利用者が自由に変更・改良して個々の需要に合わせられるようにしている。（例として）Windowsベースのキーボードに対応して文字入力ができるように画面表示のデザインを変えたりもできる。それぞれの生活の質（Quality of Life）に応じた選択肢の変更ができることは非常に重要である。
- このBCI機器の利点は、侵襲型と違ってFDAの認可の過程がそんなに大変ではないことだ。ただし、保険でカバーされるのは代替コミュニケーション手段という面だけで、まだ不十分である。
- 脳波を用いたBCIでは、P300と運動感覚野の事象関連律動変化という２つの指標は要求される制御タスクによって使い分ける必要がある。選択肢が少ない場合はP300による制御の方がうまく行くが、選択肢が増えてくる2次元制御の場合は運動感覚野の事象関連律動変化の方がよいと思われる。
- 今後の課題としては、ジェル（電極ノリ）やキャップのいらない形で装着できる乾燥素材の電極開発が急務である。また、利用者とそれを日常的に介護・介助する人たちのために出来るだけ機器の使用方法をシンプルにしたい（例、プログラム改善やコンパイラーの汎用化）。また、選択肢の中にPCのリセットボタンも含めておくと利用者、介護者ともに有難いという要望も取り入れた。改良型のバージョン１を６月に、バージョン２を12月に発表する予定である。
- 開発中のものとしては選択肢（コマンド）を音声に変換するような聴覚型BCI、ならびにECoGを用いた信号検出および処理による新型がある。また、トレーニングの過程をできるだけ簡素化できるように選択型から運動過程制御型にカーソル等の制御アルゴリズムをシフトしていきたい。このことはALS患者を主なターゲットとした商品開発である（参考までに、日常的に使用できるレベル達するまでのトレーニング時間は177時間、半年近くかかったと言う報告を紹介された）。
- BCI2000ワークショップと銘打ったBMI/BCI研究に携わる研究者の国際会議を2002年に開催し2005年にも主催した。IEEE内でもワークショップなどを主導的に企画・運営してきたがどんどん参加者が増え自分だけの手に負えなくなっている。次回2008年にBCI2000ワークショップを主催してくれる人・団体を募集中である。

Xian Yun-Cheng

- ラットでオペラント条件付けによるホフマン反射での皮質制御の影響を、24時間体制でニューロン活動、筋活動、輪回し運動等の活動をモニターして調べている（反射の振幅が大きいほど報酬の量が多くなると言う条件付け）。人為的に脊髄損傷させたラットを用いて脊髄神経の下行経路の重要性を検証している。

Aiko Thompson

- バイオフィードバックを用いたホフマン反射の振幅制御（一定範囲内に振幅をコントロールする課題、成績に応じて金銭報酬あり）をトレーニング中の被験者の脳波を計測している。
- バイオフィードバックトレーニングより、ヒトは随意的にホフマン反射の振幅を増減させることができることがわかった。また、脳波においてもトレーニングを通して波形や振幅が収斂していくことが示唆されている。

Lawrence S. Sturman

Jill Taylor

ワズワースセンターの所長と副所長。センターの運営を中心にお話を伺った。

- ワズワースセンターはニューヨーク州民のQOL向上のための疫学研究、環境科学研究、公衆衛生学研究に負う責任が大きい。
- 大学との連携ではニューヨーク州立大学からの学生受け入れや共同研究（教官が兼任）が多い。
- 国際的な連携に関しては、NIHのフォガティセンターのフェローシップ制度に良く似た Fogarty Fellowship Program（NEW YORK STATE INTERNATIONAL TRAINING PROGRAM: http://www.wadsworth.org/educate/fogarty/index.htm）という制度を有する。
- ニューヨーク州から30−50%の出資があり、他はNIH、ＮＳＦ等のグラントで運営している。脊髄損傷者の機能回復研究のために800万ドルから5000万ドル／年のファンドが９年続いている。
- Jonathan WolpawによってBCIプロジェクトが立ち上げられた。当初はIBMと州からの研究資金によって実施されていたが、1991年にNIHのファンドを獲得することができた。
- BCIのプロジェクトについては単なる技術開発研究だけでなく、利用者・介護（介助者）の心理的なサポート（トレーニングによるカーソルの制御がうまくいかない場合のメンタルケアなど）も行っている。
- 当センターで実施する研究についてその社会実装を検討する分析チーム（部外者を含む）を組織し、州民や政府向けの報告書を作成する場合もある（例としては、NY州としての脳死の定義について、遺伝子検査の実施について、など）。
- 研究計画の科学的、倫理的妥当性に関して外部から評価をしてくれるInstitutional Medicine Federal Agency Groupという制度があり、RFA（Reflection for Application）を送ると審査結果を送ってくれる。これを利用して社会的実装に関する担保をとる場合もある。
- BCIの社会実装に関する一般市民からの反応に関しては、IBMと共同で啓発イベントを行った。

4.11. コロンビア大学（ニューヨーク）

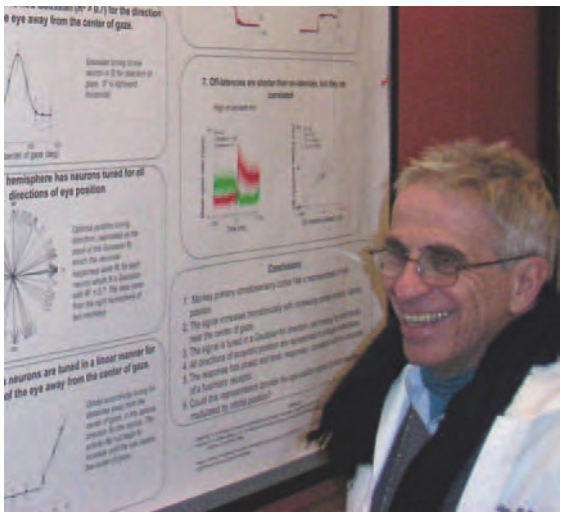
David Mahoney Center for Brain and Behavior

本センターは、実業家であるDavid Mahoneyの支援により、ノーベル賞科学者エリック・カンデルによって設立された脳科学の研究センターである。所属するファカルティ６名の多くは、２つの上位組織Center for Neurobiology and BehaviorおよびColumbia U. College of Physicians and Surgeonsにも同時に所属している。

今回は、センターの「リーダー」であるMichel Goldberg教授とJacqueline Gottlieb教授の研究室を訪問した。なお、Michel Goldberg教授は、National Eye Institute（NIHの研究所群のひとつ）のLaboratory of Sensorimotor Research（通称、LSR）のセクションチーフの一人であったところ、本センターの設立時2001年にヘッドハンティングされた。Jacqueline Gottlieb教授、および別のファカルティであるVincent Ferrera教授もLSR出身（博士研究員の経験あり）であり、さらにDaniel Saltzman教授もLSR系列のラボ（LSRで博士研究員を行っていたWilliam Newsomeスタンフォード大学教授）出身であることを考えれば、LSRの「出張所」との印象もある。実際、LSR同様、本センターも視覚情報処理およびそれに基づく眼球運動の制御に関する研究が主要テーマである。

Michael Goldberg

高次脳機能へのアプローチとして、覚醒ザルからの単一ニューロン活動の記録を用いた研究は、1960年台のNIHに始まる。特にEdward Evartsと並んで一時代を築いたのがRobert Wurtzであり、そのWurtzの右腕としてLSRの発展に貢献したのが、Goldberg教授である。Everts博士が主に手の運動に着目したのに対し、Wurtz、Goldberg両博士は、視覚的環境の統制と運動の厳密な観察が可能な眼球運動に着目した。そして、うまく考案された行動課題の導入により、視空間的注意の脳内表現を明らかにした（Goldberg and Wurtz, 1972などの４連論文）。これらの実験がその後の高次脳機能研究の基礎を作ったことは多くの脳科学者が認めるところである。



- BMIのコアテーマに近いものとしては「単一試行活動と行動との相関」を調べた研究があり、その実験により、比較的難しい行動課題を遂行中のサルの成績の変動と前頭

連合野ニューロンの「背景的」活動との間に相関があることが発見された。

- そのような行動との相関を示すニューロンのなかには、若干前の成績の影響を受けるものだけでなく、しばらく後の成績の変動を「予測」するものも多数発見された。
- 現在、使われている狭義のBMI研究は、運動の方向や意思決定などに関する具体的な思考内容の読み取りに関するものがほとんどであるが、課題成績の変動といった、集中力あるいは動機付けのレベルに関する脳内情報を単一ニューロンの活動から読み取る試みはこの研究が最初と思われる。

Jacqueline P Gottlieb

Gottlieb教授は、Goldberg教授の弟子であり、現在は独立した研究室を運営しつつも、類似の研究テーマ、類似の仮説（頭頂連合野、特にLIPと呼ばれる脳領域の主たる役割が視空間注意の調節であること）で協力関係にある。この仮説に対し対立する仮説を掲げているのは、先に訪問したカリフォルニア工科大学のRichard Andersenの一派であり、LIPは運動意図に重要と主張している。

- NIH時代は眼球運動のみに着目した課題を用いてLIPニューロンの働きを調べてきたが、Columbiaに移ってからは眼を動かさずに、左右どちらかの視野に提示された刺激の形に応じて、左右どちらかの手が握っているレバーを離す課題を導入し、視覚情報処理やニューロン活動と課題遂行に用いる手との関係を精力的に研究している。
- 運動型BMIの研究の多くは、「片手」あるいは一本のロボットアームの操作しか想定していないが、もし、将来、２本のアームを動かす必要が出た場合には、使う手に応じて注意の範囲が変わってくる、といった影響も考慮したシステムを作る必要があることを示した。
- また、もっと大きな意味で、彼女の行ってきた研究、「Active Visionを脳がどのように実現するか」は、視覚情報処理と眼球運動の制御に関して遅れているBMI研究に様々なヒントを与えてくれるものであると考えられる。

4.12. ピッツバーグ大学（ピッツバーグ）

Andrew Schwartz

世界的にサルを対象とした侵襲型BMI研究開発の第一人者としての評価を得ている研究者である。特に三次元制御のロボットアームを用いたBMI技術開発では最も高いレベルの性能を示しているとされている。侵襲型BMI研究者の系譜の中でも示したように、ポピュレーションベクターによるデコーディング研究で重要な位置を占めるDr. Apostolos P. Georgopoulosの系列にあり、基礎的な脳生理学に根ざした第一世代のBMI研究者である。インタビューの中でも強い印象を受けたのは、基礎的な脳機能の理解をふまえていないと有効な技術開発にもたどり着けないという信念とそれを実証してきた自信の元に、現在の研究を進めているという点である。

- 研究室の規模は自分の他にファカルティ１名、ポスドク２名、大学院生、学部生計７－８名という状態である。実験機材の製作は、学内の機械工作室の他、外部発注する場合もあり、自分達ではこまごましたものの工作しか手がけていない。実験用プログラムはリサーチテクニシャンがロボットアーム制御の標準型を作り、それを各自で改訂してそれぞれの目的に合わせて使用している。
- 現在実験に用いているロボットアームは数代目であり。WEB上で動画公開しているものはサイズがサルの腕と同格で軽量であったが、モーターの性能が悪くがたつきが多かった。現在はBarrett Technology社の制御系ネットワークを内蔵したより滑らかな動きが可能なジョイントコントロール型ロボットアームを使用している。ただし、サイズがとても大きい。

- Schwartz研究室では現在は作業座標上の３次元位置の制御を行っているが、このロボットアームは各関節でトルク制御をすることが可能なアームであり、脳活動によって直接トルク制御をすることも可能であるので、脳の運動に関する情報表現を考える上ではそのような使い方もありえるかもしれないと考えられる（森本博士談）。
- Barrett Technology社出身（かつカーネギーメロン大学Robotics Institute出身）の技師が在籍している。

- 将来的には開閉型の運動制御しか出来ない手指の部分に関して精巧な形状と制御系のあるロボットハンドを用いた開発研究を展開する。
- ロボットアームの動きは外部に設置した12台のカメラによりOptic Trackとして記録、解析している。
- 自分は運動制御の脳内機構を学習のメカニズム解明という観点から調べてきて、それをBMIによるロボットアーム制御という形で成果にした。BMI研究開発を通して何を学んできたかと言うと、ポピュレーションコーディングを基本とした誤差修正メカニズムをもとにサルは運動を学習していると言う前提を見つけたのが第一である。
- 自分のポリシーは、脳の働きを知るためにBMIをやっているのであって、その制御系は脳のメカニズムの利用が基本だということ。恣意的な脳機能の操作介入はしない、というやり方を貫いているつもりだ。
- （誤差学習を利用すれば一次運動野以外の皮質領野からの信号によってもロボットアームを動かせるようになると思うかという質問に対しては）その可能性はあると思うとの回答であった。
- （大脳皮質運動野における運動制御メカニズムに関するベクトル符号化説と筋活動再現説の対立に関する見解を問われて）自分たちの研究グループは運動軌道と神経細胞の活動に有意な相関があることを発見し、それを利用しているだけだ、BMIによって機器を動かすことにおいて重要なのは速度依存型制御である、ということに関しても示してきた。これらは（どちらの仮説が正しいということとは別に）自分達の長年の経験の蓄積によって確立してきた理論であり、これからもこの知見を生かした研究をしていきたい。
- 今までに３次元のロボットアームの制御に成功したBMI研究は自分達のグループだけである。ロボットアーム制御においては2次元制御だけでは導入する意味は少なく、やはり３次元での動きの実用化には必要である。
- 自分達の研究室のおもな資金源はNIHのR01、他にDARPAである。プライベートファンドからの寄付などはない。
- BMIの市場開拓は非常に重要、自分としては脊髄損傷者のために精緻な手指・腕の運動制御の機能代償をできる神経義肢を開発するのが当面の目標である。脊髄損傷のレベルにもいろいろあるが、従来型のロボットアームの市場はごくごく小さく、手指の独立運動制御を「商品として」確立しなくては、需要は増えない。
- 将来の方向性としては、他に感覚フィードバックを考えなくてはならない。指標としては指先の触覚に関心がある。生理学的な指標によるアプローチとはいえないが、信号としての認識・検出がしやすい、というところが利点だと思う。
- BMI研究における自分の次のステップ（構想）は電極開発共同研究センター（Joint Center for Electrode Development）である。これに関してはNIHに働きかけて連邦レベルのセンターとして、それをピッツバーグに設立したいと考えている。
- 電極開発共同研究センターはBMIに用いる電極の１）新素材、２）検出信号処理の無

線化、3)生体への影響、に関して関連領域の技術者と研究者がひとつの場所に集まって共同作業として3－5年の開発に取り組むというイメージである。

- 自分が作っているBMIはマインドリーディングのために用いる機器とは考えていない。あんなものはただのSFだ。自分はあくまでも科学者でありベーシックな仕事をしているという自覚がある。それを判ってくれる人に判ってもらえるというだけで十分であると思う。
- ALS患者でのECoGをもちいたコミュニケーションツールとしてのBMI開発にも興味がある。今そのようなプロジェクトにも加わっている。
- この分野の第一人者はBirbauerである。当該研究が進めば、患者自身による生き方、治療の選択肢の明示が可能になるから、終末期医療のあり方を変えるかもしれない。
- 人為的な皮質内電気刺激の手法を自分はあまり好まないが、固有受容フィードバックの利用は重要である。
- （下肢運動制御や顔面運動制御へ研究を展開する予定は、との質問に）自分自身で手を下すかはわからないし、皮質の信号をもとにBMI研究開発をやる意義は、下肢は特に自律的な歩行制御の機能と随意的な制御機能系が混在しているので、難しいのではないか。
- 自分のモットーはScience is Firstである（この後Technology is Easyというコメントまで飛び出した)。サイエンスをすることは臨床応用に有効かもしれないが、テクノロジーだけでは有効かどうかわからない（基礎研究にも臨床応用への貢献の意味、余地がある、と言うニュアンスあり)。

- BMIのパラメータに応じてサルのニューロンのPreferred directionは訓練により変化するので、BMIのパラメータは実験中は固定する。BMIと脳のCo-adaptationには彼自身は興味が無いとのことであった。

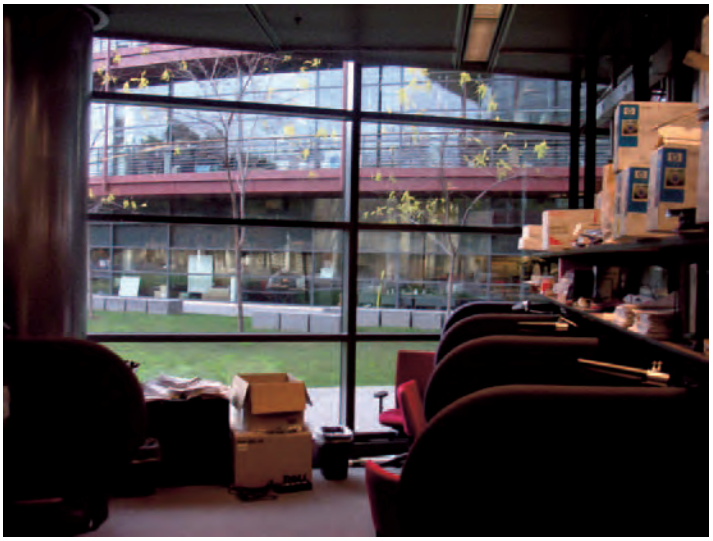
- Schwartz氏は、BMIの性能を評価する基準として、扱える次元（Schwartz氏の場合は３次元）、動作速度、スムースさの３つを挙げていた。
- １日１時間２週間程度訓練したサルのロボット制御のパフォーマンスをライブで（モニタを通して）見ることができた。この時点では、サルがエサの場所までロボットアームを正確に持っていくことは困難であったが、実験者の手を借りることなく何とかサルはエサを口にいれることは達成していた。これだけ正確に３次元の作業空間上の手先位置をサルの脳活動で制御できるという事実は注目に値する。なかなか言うことを聞かないロボットアームをなんとか手なずけようとしているサルの様子が伺えた。
- 今後は、ワシントン大学のYoky Matsuoka氏との共同研究によってロボットのアームのみならずロボットハンドの制御を行う予定であるとのこと。ロボットハンドの制御を行うにあたっては、アームだけの場合に比べて自由度が格段に多くなることが問題となる。それに対しては脳の情報表現を理解した上で適切な次元縮約方法を考えるとのこと。
- ロボットハンドを使った把持動作を行うのは視覚情報だけでは困難であるため。そこでロボットハンドの触覚センサ情報をサルの感覚野へフィードバックすることを考えているようだ。
- はじめからこれらの問題に取り組むのは困難であるため、まずは把持に関してはソフトウェアによって支援することを考えているとのこと。具体的な候補としては、GraspIt!（http://www1.cs.columbia.edu/~amiller/graspit/）というソフトウェアを使って把持計画問題はソフトウェアで解決する方向を検討中らしい。
- 脳活動データの処理アルゴリズムの開発は、カーネギーメロン大学の統計学の教授であるRobert Kass氏と共同研究している。

4.13. スタンフォード大学（サンフランシスコ）

Krishna Shenoy

- 脳活動記録システムには、ロボット制御にも広く用いられているリアルタイムLinuxをOSとして用いている。
- Utah arrayを電極として用いている。
- BCIの性能評価の指標として、タスクの困難さ、動作速度、正確さの３つを用いている。
- BCIへの入力として背側の運動前野(PMd)の脳活動を用いている。
- BMIの性能を維持するためには、電極のずれに対する頑健性が重要であることを指摘。
- ターゲットの提示から150-250msの時間窓の神経活動データを予測に用いる。
- BMIのための適切なターゲット配置に関する研究を行っている。
- Jose Carmena（UC Berkeley）はNicolelis研究室の出身。ロボティクスのバックグラウンドを持つ。
- スタンフォード大学ではBio-Xという学際領域プロジェクトが進行している。訪問したKrishna Shenoy氏は機械学習分野のAndrew Ng氏と共同でgrant proposalを

作成中のこと。スタンフォード大学はOussama Khatib氏やSebastian Thrun氏などの著名なロボット分野の教員を擁しているが、BMIとして直接共同研究を行っているということは現在のところ無いようだ。



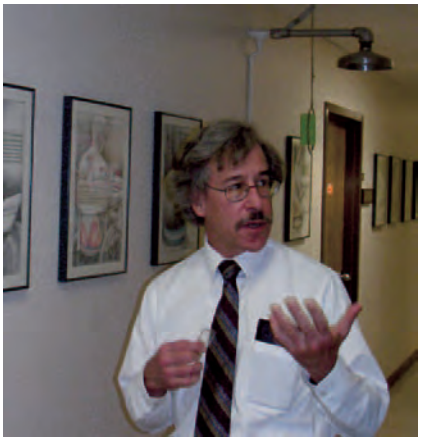
4.14. 南カリフォルニア大学（ロサンゼルス）

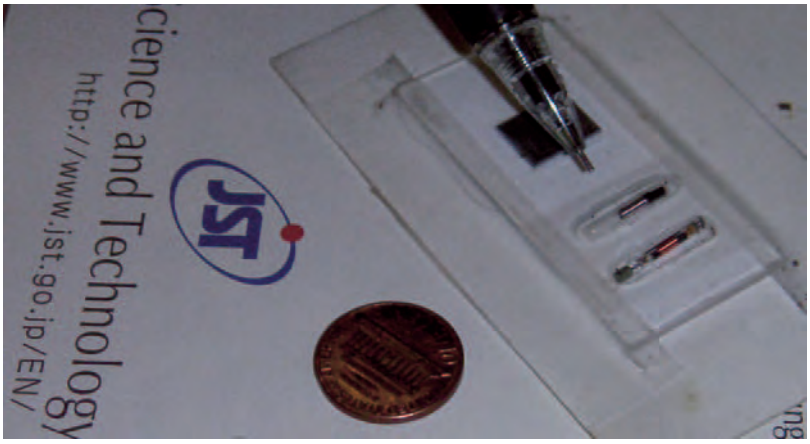
Gerald E. Loeb

- 損傷を受けた神経や筋肉に微弱な電気刺激を与える装置BION（bionic neuron）の開発者。体外電源を使っている。
- 主に動物実験としては、ラットやネコを使った研究を行っている。これらの動物は動き回るので、無線でBIONを用いる利点がある。
- サルの実験の場合、無線でBIONを用いる必要性が現在のところ無いので、サルを対象にした実験は行っていない。
- 多くのラットにBIONを用いて、それぞれに異なる刺激を同時に与えることも可能である。
- 同様に、複数のBIONを一人の患者に用いて、異なる筋肉を独立に運動させることも将来的には考えている。
- 触覚センサを用いて、そのセンサデータによってBIONを制御することも考えている。

この場合、脳までセンサ信号を送る必要はないかもしれない。

- 機能的電気刺激（FES）を用いて歩行再建を行わせようとするグループもあるが、これは無意味であるという意見であった。その理由としては、転倒のリスクが高い上に、移動のためのエネルギー効率の観点からは車いすを用いた方が合理的であるからとのこと。
- BIONを歩行運動に応用した例は存在する。足先を十分に上げるための筋力がはたらかないため、床面からクリアランスを作ることができずに足先が床に引っかかる症状（“foot drop”）が存在する。この症状への対策として、足先に傾斜角センサを付けて、そのセンサ信号に応じてBIONを駆動し足先が上がるようにする。
- この研究室では、BMIを開発しているというよりはBMIのユーザーであるという立場。BMIによって検出された脳活動を用いてBIONを駆動するということだと思われる。そうすればロボットアームを用いることなく、自分の腕を動かすことが可能となるかもしれない。
- FDA-IRB（Institutional Review Boards、倫理委員会）やUSC-IRBにデバイスを改善する毎に再度申請する必要があることが煩わしいとのこと。
- 肩の動きを使って、肘の動きを制御するための研究も行っている。肩の自由度以上の運動を行うことは当然できないが、肩と肘の動きを対応させても日常動作には必要な動きが生成されるのかもしれない。
- 体外電源を用いることを前提にすると、現在のBIONはこれ以上小さくすることができないという大きさにまでなっている。





4.15. カリフォルニア大学ロサンゼルス校（ロサンゼルス）

Jack W. Judy

Gene Fridman

Steven W. Badelt

- BMIへの応用に限らずMEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）一般の研究をしているとのこと。
- BMIの信頼性を向上するための研究や、BMIに用いる小型のプロセッサでも処理可能なエネルギー効率の良いアルゴリズムの開発、データ圧縮方法の開発を行っている。しかし、現時点では具体的な成果は出ていないようだ。
- 工学と科学の狭間の研究領域であり、研究資金の確保は困難であることが多いとのこと。
- MEMSの分野ではTiny OS（http://www.tinyos.net/）というオペレーティングシステムが用いられている。
- 現在、BMIにも用いることができる小型データ処理チップを開発するためのgrantを獲得しようとしている。ユタ大学が開発したチップ（１種類の処理プログラムを用いる）に比べてより柔軟性があり、多様な処理プログラムを実装することができるようになることが特徴。サンプリングレート30kHz、100チャネルを目指している。

GTeC 報告書

「ブレイン・マシン・インターフェース」（米国）

平成 19 年3月

独立行政法人 科学技術振興機構

研究開発戦略センター

Copyright 2007 by JST/CRDS

無断での転載・複写を禁じます。