

## 脳情報学5: ブレインネットワークインタフェース

川人光男

ATR脳情報研究所

### 脳を活かす

- **脳を読む**  
ニューロエコノミクス、ニューロマーケティング、  
ニューロゲノミクス、ニューロポリティクス  
人間の精神・社会活動を生物学的基盤から理解し  
応用する
- **脳を繋ぐ**  
ブレイン・マシン・インタフェース、ブレイン・コン  
ピュータ・インタフェース、ブレイン・ネットワーク・イ  
ンタフェース  
まったく新しいコミュニケーション技術
- **脳と社会; 神経倫理学 (Neuroethics)**  
脳科学の応用を倫理から考える。  
倫理を脳科学から考える。脳科学の究極の応用

### “脳を読む”の社会的応用

#### ニューロゲノミクス

神経疾患に関わる遺伝子の同定  
遺伝子多型による脳活動パターンの違い; 個性の生物学的基盤

#### ニューロエコノミクス

意思決定・経済行動に関わる脳活動の研究

#### ニューロマーケティング

脳活動から消費者の購買行動を予測  
「ペプシが好き, コカ・コーラが好き？」

#### ニューロポリティクス

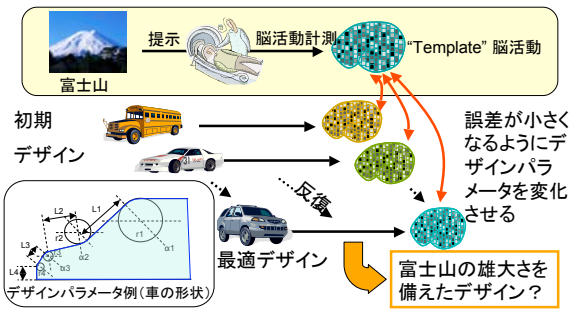
脳に関わる遺伝子多型と政治的性向  
保守 vs. 革新とセロトニン・トランスポーター多型  
との相関  
政治的性向による脳活動パターンの違い; 米の共和党支持者  
と民主党支持者の脳活動パターンの違い

### ニューロマーケティングの例

- ペプシコーラと、コカコーラの選択で、脳の異なる部位が競合、ブランディングの脳科学
- ホンダのフェイス (顔型ヘッドライト) の開発で、ATRの脳活動イメージングセンターのfMRIが活躍
- デジタル音響機器の高周波カットが脳幹の活動低下、免疫力低下などを招く: 放送通信規格等の脳科学的な評価の必要性

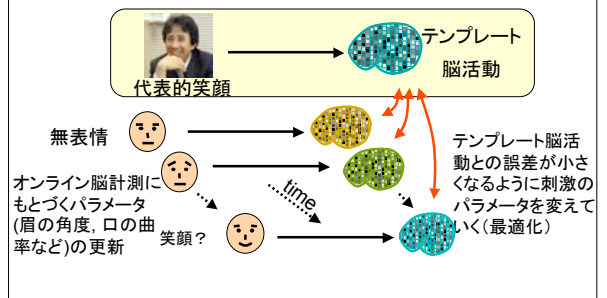
## 神経最適化(神谷、澤島、木村)

デザインパラメータを変化させ、脳活動を特定の“template”脳活動に近づけるとどうなるか？



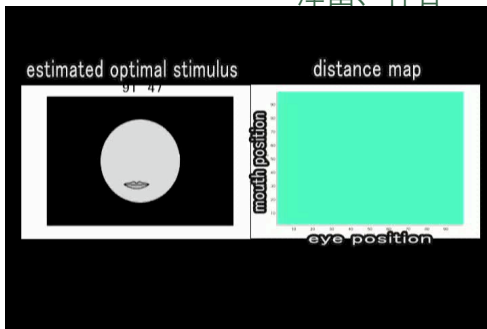
## 神経最適化 (Neuro-optimization)

澤島、神谷



## ニューロ福笑い

澤島、神谷



## ブレイン・マシン・インタフェース

脳の感覚・中枢・運動機能を電氣的人工回路で補綴・再建・増進



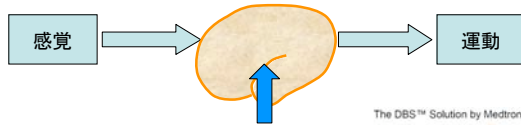
人工感覚型BMI

- 人工内耳 コクレア社(オーストラリア)
- 人工網膜
- 人工視覚 ドーベル研究所(ポルトガル)



## ブレイン・マシン・ インタフェース

脳の感覚・中枢・運動機能を電気的人工回路で  
補綴・再建・増進



中枢介入型BMI

- 深部脳刺激 メドトロニック社(米国)



## ブレイン・マシン・ インタフェース

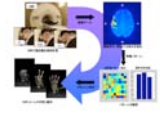
脳の感覚・中枢・運動機能を電気的人工回路で  
補綴・再建・増進



運動再建型BMI

- 多重電極(サイバーキネティクス社 米国)

- 硬膜下電極
- 脳波
- 近赤外光

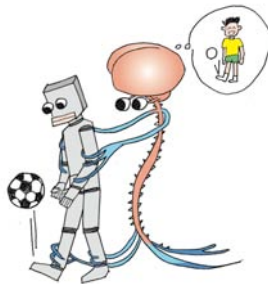


- ブレイン・ネットワーク・インタフェース(HONDA-ATR 日本)

## ブレイン・マシン・ インタフェース

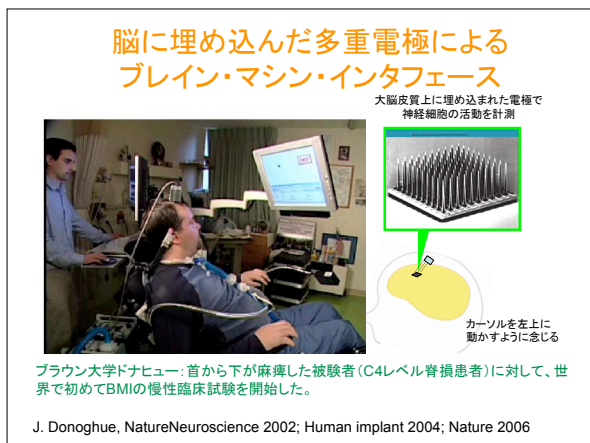
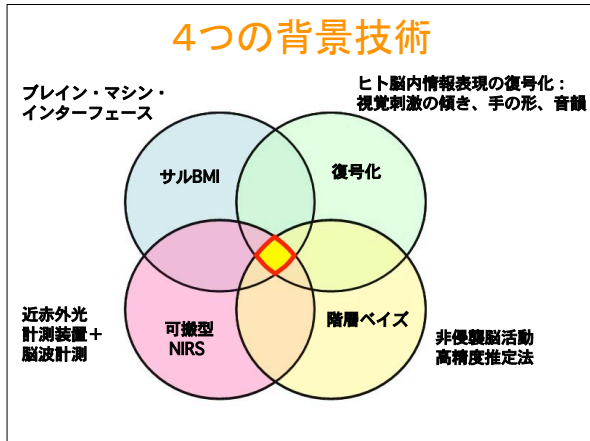
脳と情報通信機器を直接繋ぐ技術

1. 失われた感覚の再建
2. 運動・コミュニケーション機能の再建
3. 超高速のコミュニケーション・機器操作
4. 非言語、意識化の情報のコミュニケーション
5. 大規模で複雑なシステムの脳活動による直接制御
6. 神経科学の道具

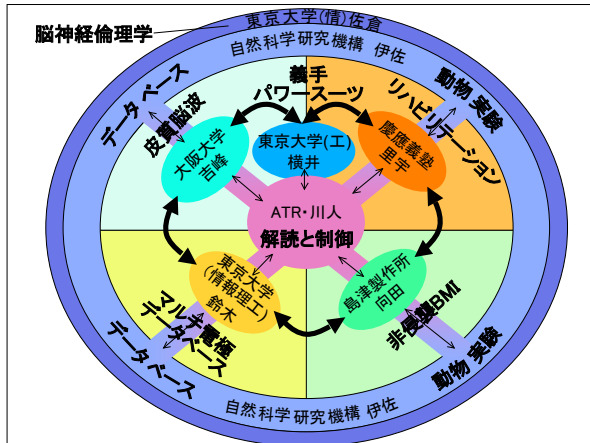


## 脳を繋ぐ3種類のインタフェース

- **ブレイン・マシン・インタフェース**  
脳内に刺入した慢性電極からニューロン活動を記録し、運動指令などを推定
- **ブレイン・コンピュータ・インタフェース**  
脳表面から脳波(電位)を記録し、信号処理とユーザ訓練の組み合わせで性能向上
- **ブレイン・ネットワーク・インタフェース**  
非侵襲脳活動計測の組み合わせなどで逆問題を解き、脳活動を高時間、高空間分解能で推定し、ユーザ訓練を大幅に低減



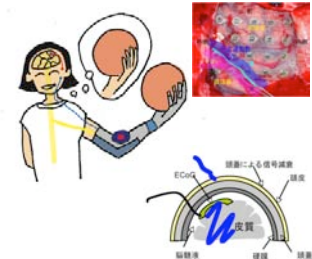
- ### BMI成功の3要素
1. 神経科学の知識
    - 運動野
    - ニューロン発火頻度
    - ポピュレーション符号化
  2. 機械学習(脳情報解読)
    - 脳活動から情報(運動、画像等)へのマップ
    - ニューラルネット、SVM, SLR, SR等
  3. ユーザ訓練(シナプス可塑性)



### (1) 皮質脳波(EECoG)による BMIの開発と臨床実験

大阪大学、東京大学、自然科学研究機構、ATR

中心溝内電極留置という独自の技術を持つ大阪大学が中心となり、患者を対象として皮質脳波(EECoG)を用いて、BMIによる運動・言語機能の再建を行う。ATRが脳内情報解読と義手の運動制御モデルを担当する。東京大学横井Gは、ハンド部に操縦機能を持つ超多自由度の義手を開発する。東京大学鈴木Gは超薄型で柔軟な多チャンネルEECoG電極を開発し、自然科学研究機構は動物実験によって電極開発を支援する。自然科学研究機構は同時に、逆問題の正解を提供してATRの脳情報抽出アルゴリズム開発を助ける。大阪大学、東京大学鈴木Gは共同で、無線機能と非接触電力供給能力を持つ実用型EECoG-BMIシステムを完成させる。



### 皮質脳波を用いたbrain mappingとneural decoding

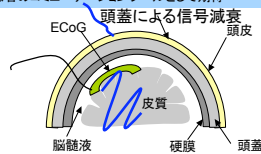
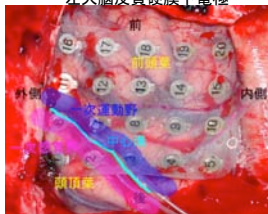


平田 雅之、柳澤 琢史、澁谷 大輔、齋藤 洋一、加藤 天美、神谷 之康、吉峰 俊樹  
 (阪大) (阪大/ATR) (ATR/慶長先端大) (阪大) (近畿大) (ATR) (阪大)  
 信学技報, vol.107, no.263, NC2007-52, pp.105-108 (2007年10月)

#### 研究目的

硬膜下電極から測定される脳活動をデコーディングし、その結果を用いて機械をトレーニングなしに動かす ⇒ ALSやLocked-In症候群患者のコミュニケーションツールとして期待

#### 左大脳皮質硬膜下電極

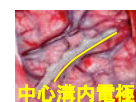


#### 特徴

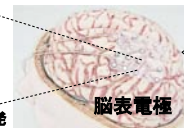
- ノイズが少ない
- 信号が強い (EEGに比べて)
- EOG, ECG, EMGなどの信号が入らない
- クロストークが少ない
- 埋め込みのための手術が必要

\*この報告する結果は、治療目的のためにEECoG留置された患者の中で、実験目的の内容などにより詳細を隠した方の同意を得て、実験を行ったものです(インフォームドコンセントを得て)。

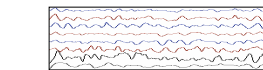
### EECoG (皮質脳波)による高精度復号化技術



中心溝内電極  
大阪大学にて独自開発



脳表電極



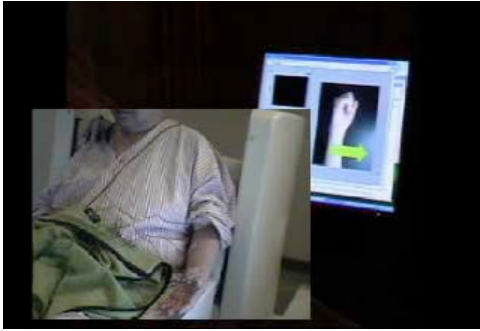
脳信号から運動パターンを解読(復号化)



PCへ出力

脳表電極(20極): 正答率80%  
 中心溝内電極(4極): 正答率88%  
 脳表+中心溝内電極: 正答率90%

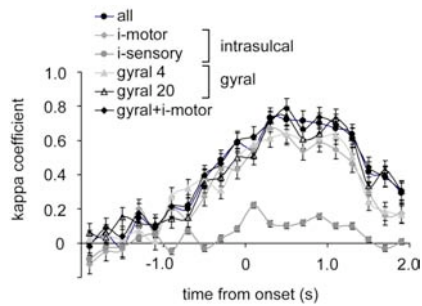
## Brain Computer Interfaceへの応用



## Brain Computer Interfaceへの応用



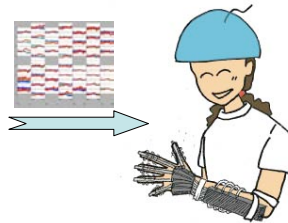
## 数百ミリ秒前から予測可能



(Yanagisawa, Hirata, Shibuya, Kishima, Saitoh, Kato, Kamitani, Yoshimine, submitted)

## (2) 非侵襲型BMIを活用したリハビリテーション 技・機器の開発と臨床実験

慶應義塾、島津製作所、東京大学、自然科学研究機構、ATR



慶應義塾が開発したEEG-BMIにつき、想定受益者である脊髄損傷、神経難病、脳卒中などの疾患群で実証実験を行う。その結果を、ATR-島津製作所のNIRS-EEG複合可搬型脳活動計測システムの開発に活用し、リハビリテーションに応用する。脳活動データベースは、統合データベースプラットフォームで可能な限り公開する。またBMIリハビリテーションによる中枢神経の可塑性について、自然科学研究機構がサルを用いた動物実験を担当する。東京大学横井GはBMIリハビリテーション用の電動装具を開発する。

## 脳インタフェースの研究動向

- 侵襲から非侵襲へ
- 訓練から自然な脳活動へ
- オフラインから実時間へ
- 重厚長大から軽量・安価・携帯へ
- 基礎研究から応用・開発へ
- 脳の計算モデルを活用
- 逆問題推定を基礎に



## 非侵襲脳活動計測

	PET	fMRI (磁気共鳴)	NIRS (近赤外光)	MEG (脳磁図)	EEG (脳波)
空間分解能	○	◎	○	?	?
時間分解能	×	△	△	◎	◎
携帯性	×	×	◎	△	◎
安全性	×	○	◎	◎	◎

PET、fMRI、NIRS : 空間分解能が高い  
 MEG、EEG : 時間分解能が高い  
 ? : 不良設定問題の解き方に依存

高精度大規模装置

fMRI + MEG

簡便可搬型装置

NIRS + EEG

## ALS患者への脳波BCIの臨床実施

Birbaumer et al., (1999) Nature

- 脳波でカーソルを動かす
  - 頭皮上の2カ所の電極(A, B)の電位を計測
  - 電位とカーソルの動きの関係

電位  
 プラス 右  
 マイナス 左  
 電極A 上  
 電極B 下

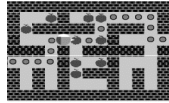
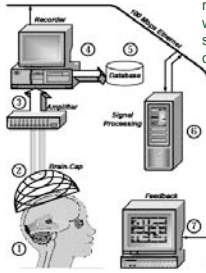


- 携帯電話に似た文字入力ソフトと組み合わせ、全身麻痺の人が長文を書くことに成功

50日間、5万回訓練して、正答率75%

## 脳波リアルタイムBCI分散システム

The user has sometimes the feeling that Pacman moves in the correct direction though the user was **consciously not aware** of his decision, sometimes **consciously not even ready** for a decision.



応用例: ゲーム (パックマン)

- real time processing of 128-channels EEG data by parallel computer
- Fisher's Discriminant; classifier with minimum probability of misclassifications
- move packman forward or backward by EEG

Krepki et al. Klaus-Robert Muller, DMS '03

Proc Natl Acad Sci U S A. 2004 Dec  
21;101(51):17849-54.

Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans.

( brain-machine interface/ electroencephalography )  
Jonathan R. Wolpaw and Dennis J. McFarland

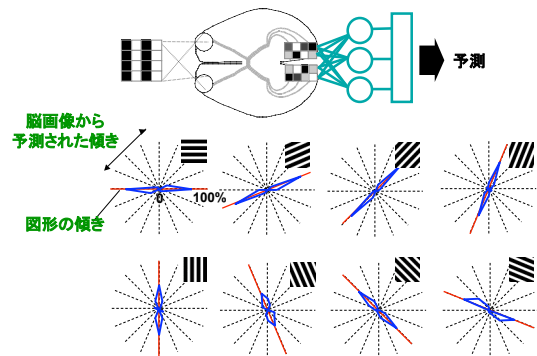


## 脳／心の解読 (デコーディング)

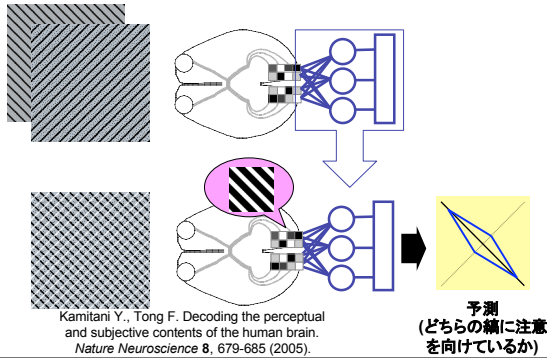


(modified from <http://whatisthematrix.warnerbros.com/>) 神谷之康 ATR脳情報研究所  
Scientific American 50 (2004-2005) 受賞

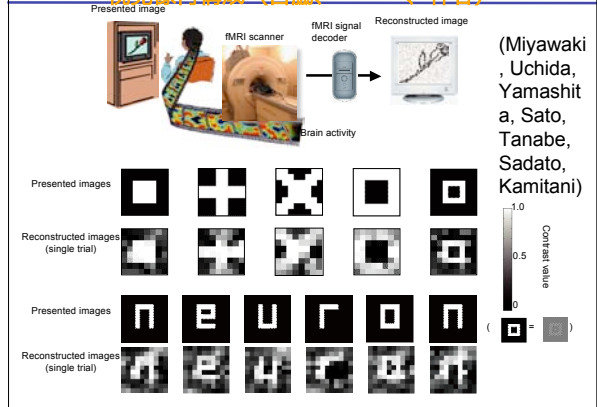
## 脳画像のパターン認識による視覚刺激の予測



## 主観的知覚内容の解読(心を読む)



## 視覚像再構成 (宮脇、・・・、神谷)



## 運動制御への復号化の拡張

1. じゃんけんぽんのパターン認識  
大脳皮質第1次運動野
2. 音韻のパターン認識  
母音：小脳  
子音：大脳皮質第1次運動野

## 侵襲型と非侵襲BMI

### 侵襲型

- 高時間空間分解能
- ニューロン活動
- 高性能

### 非侵襲型

- 低SN
- 脳波、近赤外光計測、脳磁図、fMRI
- 低い性能
- 過度なユーザ訓練

### ATRの新しい視点

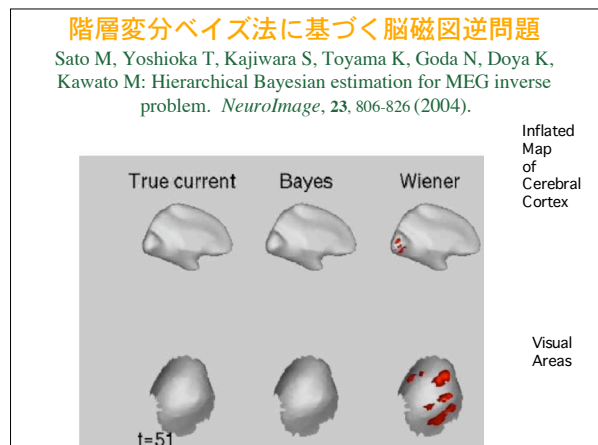
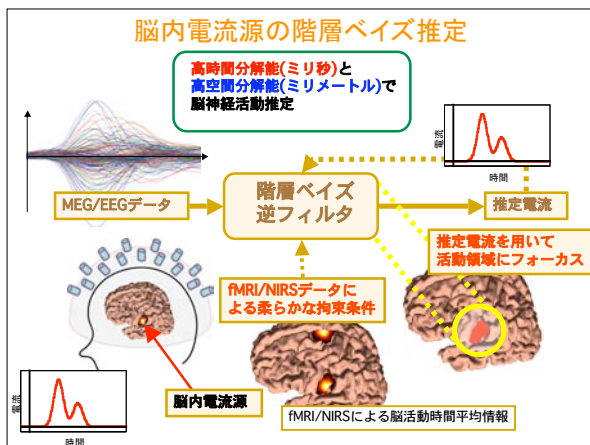
- 多点観測、機械学習
- 高性能
- 自然な脳活動
- ユーザ訓練なし

方法	BMI	BCI
長所	神経活動測定	非侵襲的
短所	侵襲的のため 適用範囲限定	神経活動はブラックボックスのため 機能限定

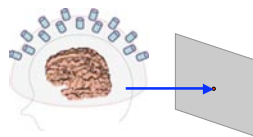
↓

New Technology

非侵襲計測による高精度神経活動推定

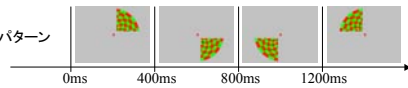


## 視覚実験課題遂行時の 高時空間分解能脳活動推定

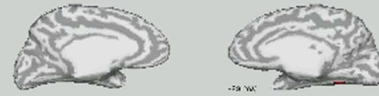
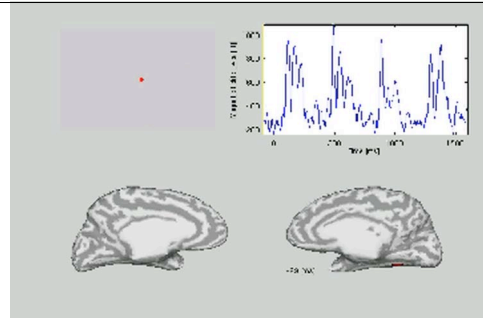


被験者は固視点(赤)を注視し、  
その間に比較的短い時間間隔で  
視覚刺激を連続的に提示する。

視覚刺激時系列パターン

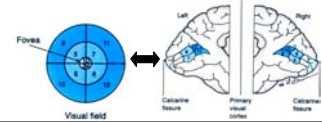


四半視野刺激を連続して被験者に提示したときの脳磁図から  
初期視覚野の脳活動を推定する。



視野と初期視覚野の位相情報  
の対応(レチノトピー)

出典: Kandel ER, Schwarz JH,  
Jessell TM, Principles of  
Neural Science, 3rd ed.



## 非侵襲高機能BMIの仕様

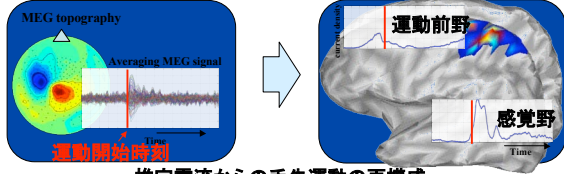
- **安価**(手術、fMRI, PET, MEG等を使用しない) = 脳波、光トポにもとづく
- **安全性**(暴走しない) = 汎化性能 = 限局した脳活動を計測する必要
- **使用感**(学習しやすさ) = 本来の脳情報の表現を利用する = 限局、神経科学
- **高機能**(高い操作性) = 多自由度、高正答率 = 統計手法、限局

## 脳情報解読の新手法 ブレインネットワークインタフェース

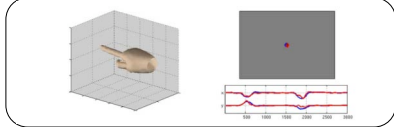
- 強力な解読手法のためには、脳活動データの次元が高くなってならない
- 脳波、近赤外、脳磁図ではたかだか数十から数百
- 逆問題を解いて脳内の数千から数万の格子点での電流を推定
- 階層ベイズ推定法(VB法)では、複数の非侵襲計測法を組み合わせ、逆問題を精度良く解く
- このままで機械学習アルゴリズムを使うとパラメータが多すぎてオーバーフィットし汎化しない
- 様々な方法で特徴ベクトルの絞り込みを行い汎化性能を上げる(ATR脳研から5つの論文)

## 手先運動のvbMEGによる再構成

戸田、今水、佐藤、和田、川人  
ヒト運動中の脳活動計測 階層ベイズによる電流源推定



推定電流からの手先運動の再構成



Toda A, Imamizu H, Sato M, Wada Y, Kawato M. Reconstruction of temporal movement from single-trial non-invasive brain activity: A hierarchical Bayesian method. *Proceedings of 14th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2007)*. WED-4, p.131 (2007)

## 実験タスク (MEG, fMRI実験)

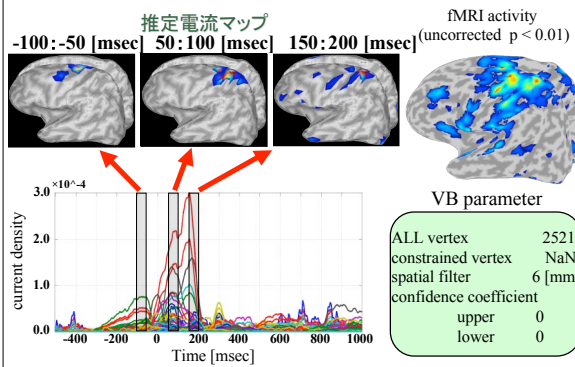


右手首を一定の速度で8方向に運動させる

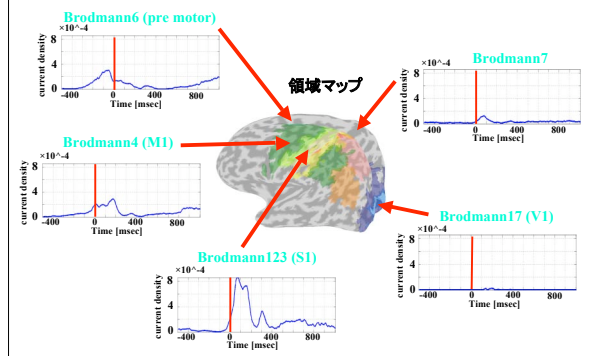
運動中の手先の位置と脳活動 (MEG, fMRI) を記録

MEGシステム: MEGvision PQ1400R, 208channel, MaxSamplingRate 2kHz

## 推定電流波形



## 領域ごとの推定電流強度時間波形



## 運動課題と回帰

- Task  
Brain activity was measured by MEG while subject move right hand. Also hand position. (hand movement is extension and flection , each 100trial)
- Analysis  
Predict hand position (and velocity, acceleration) from brain activity apply to below liner regression equation.

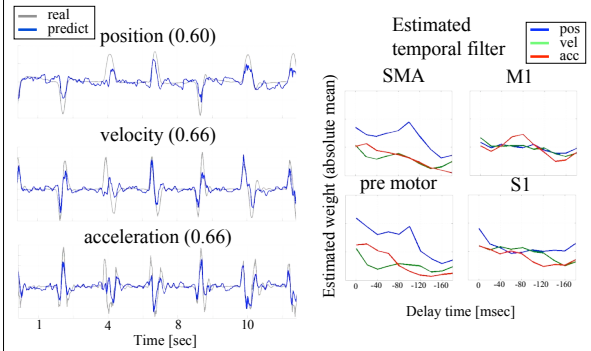
$$\text{Re } g(t) = a + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^M b_{ij} S_i(t-j)$$

$S_i(t)$  : MEG signal or current was subsampling 20[msec]  
M=10 , 200[msec] time window



## 脳内の推定電流からの回帰

single trial reconstruction by linear spatio-temporal filter



## fNIRSとEEGの複合機

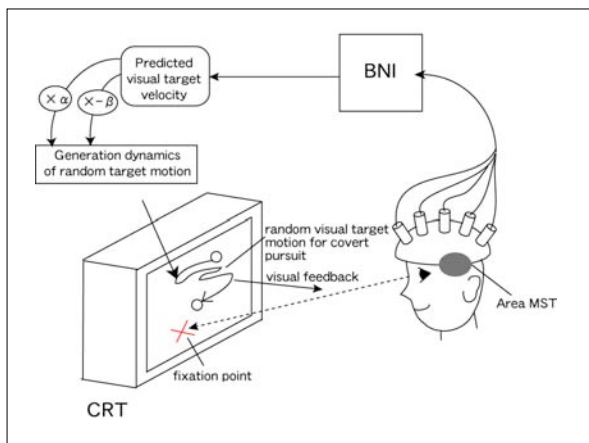
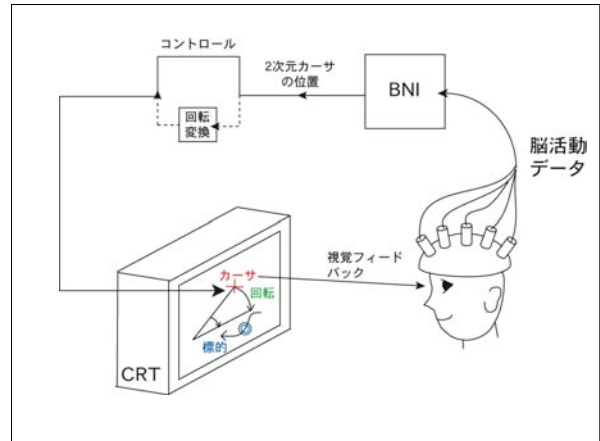


## 制御脳科学の新しい流れ

1. 理論と実験データの時間相関を超える新しいパラダイムの必要性
2. 脳からの情報抽出とフィードバック
3. 理論に基づいたフィードバックの操作
4. 抽出された脳情報の変更と、脳全体の活動の変化
5. 理論とデータの因果関係の保証
6. 制御に基づいた理論の展開

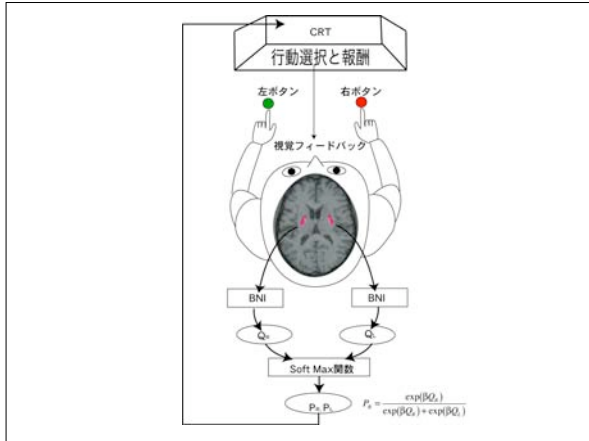
## 推定した脳活動から情報を抽出し、 脳にフィードバックする

- EEG, MEGなどから2次元カーサーの動きを制御できるように訓練する
- ランダムに動く標的の追跡課題
- 脳活動とカーサーの動きの間に任意の変換(例えば回転、ダイナミクス、ノイズ)を挿入
- 学習に伴う脳活動の変化を計測
- 脳活動と課題遂行の因果関係は保証されている
- 情報抽出する脳部位を系統的に検索
- 今水実験のブレイン・ネットワーク・インタフェース版



## 行動状態価値関数に基づいて 意志決定を操作する

- ブレイン・ネットワーク・インタフェースにより実際の意志決定や運動開始前の実行可能 (Andersen 2004, Muller 2003)
- 行動状態価値関数を神経発火、BOLD信号として表現可能 (鮫島、春野)
- 左右の行動状態価値関数の差で意志決定
- 左右のQ関数から後の行動決定を復号化と修正式で修飾
- 意志決定式の変更に伴う行動学習と脳活動の変化を計測
- 脳活動と行動学習の因果律は保証されている
- 脳内の各部位から活動をとり意志決定につなげる



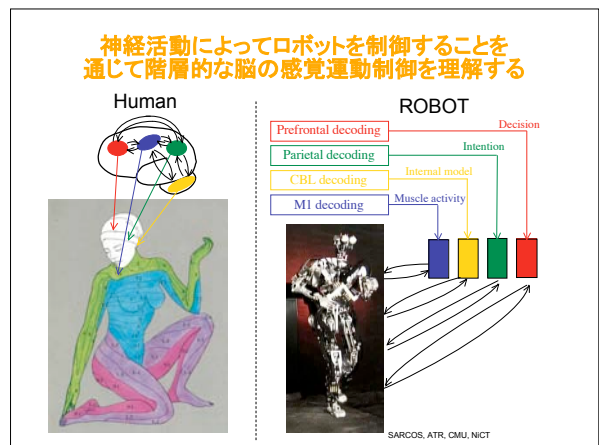
## ATRブレイン・ネットワーク・インタフェースの特長と将来

1. 複数の非侵襲計測手法の組み合わせ
2. 逆問題を変分階層ベイズ推定法で解いて脳の空間で特徴抽出
3. 高度な機械学習でユーザ訓練を最小化
4. 神経科学の知識を脳空間で用いる
5. 運動制御計算モデルによる階層制御
6. 脳の順モデルを用いた逆問題解法と多種情報の同時推定

### ヒューマノイドロボットCB-i

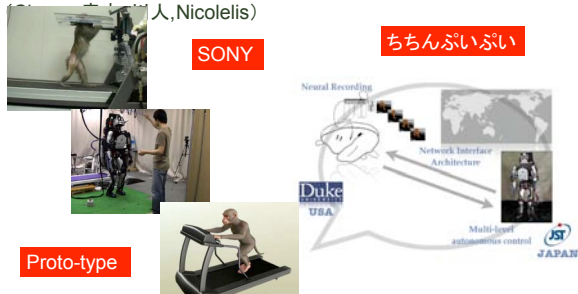
An ATR/SARCOS development with ICORP/JST funding

- ・ 人間により近いヒューマノイドロボット (同程度の速さと力)
- ・ 自律型
- ・ 160cm and 70 Kg
- ・ 柔らかい



## 計算脳プロジェクトの報道発表

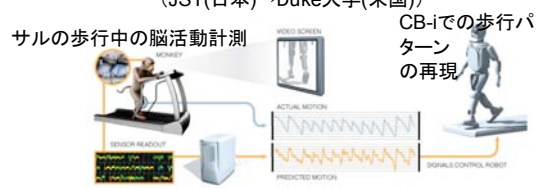
サルの大脳皮質のニューロン活動情報をネットワークを介して伝送（米国～日本間）し、リアルタイムでヒューマノイドロボットを歩行させる



Cheng G, Fitzsimmons N, Morimoto J, Lebedev M, Kawato M, Nicolelis M: Bipedal locomotion with a humanoid robot controlled by cortical ensemble activity. *Society for Neuroscience 37th Annual Meeting*, 517.22 (2007)

## 脳の歩行制御メカニズムの理解： サル脳活動によるロボット制御

ロボットの映像のリアルタイム送信  
(JST(日本)→Duke大学(米国))

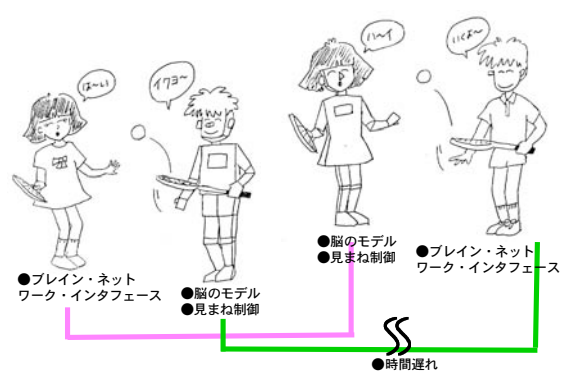


変換された脳活動データのインターネットを介したリアルタイム送信  
(Duke大学(米国)→JST(日本))

## 脳の歩行制御メカニズムの理解： サル脳活動によるロボット制御



## ブレイン・ネットワーク・インタフェース、 脳計算モデルとヒューマノイドによる情報通信



## Neuroethics (神経倫理)

- 脳計測と脳刺激の進歩→危険性の現実化
  - うそ発見器などプライバシー侵害
  - 脳の形態・活動から潜在的神経病理を予測
  - 個人の意志決定メカニズムに介入
  - 記憶の操作・書き換え
- 米大統領の生命倫理審議会
  - クローンや臓器移植と並ぶ審議項目に