

# ブレイン・マシン・インタフェース

## Brain-Machine Interface

ATR脳情報解析研究所 計算脳イメージング研究室 室長  
理研革新知能統合研究センター チームリーダー  
CINET 客員研究員  
大阪大学院 生命機能研究科 客員準教授

山下 宙人

# Brain Machine Interface (BMI)

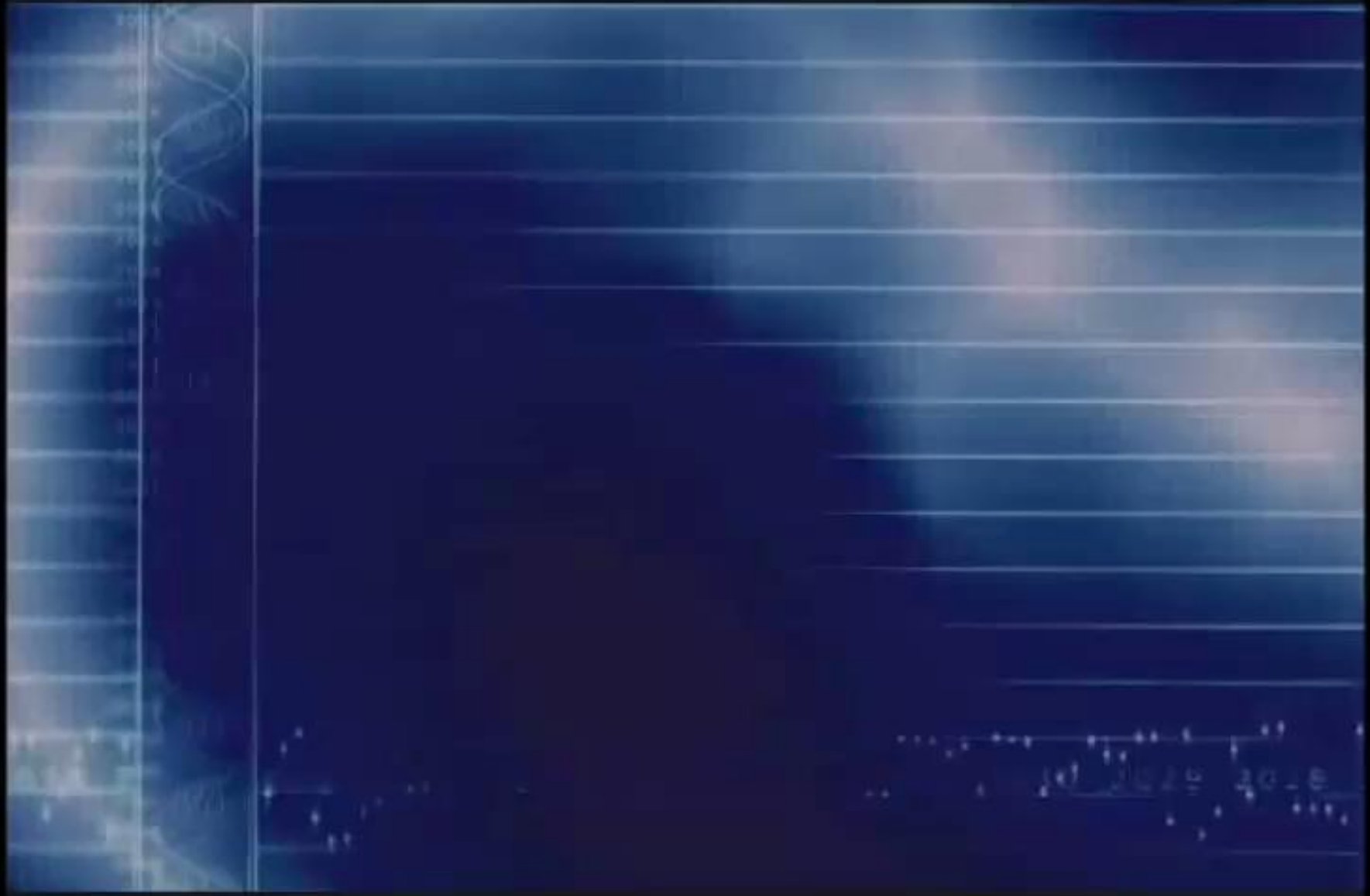


“The Matrix”



ソードアートオンライン

BMI = “考えるだけで〇〇をする装置”



# BMI: 四肢麻痺患者の機能代替 - ロボットハンド制御

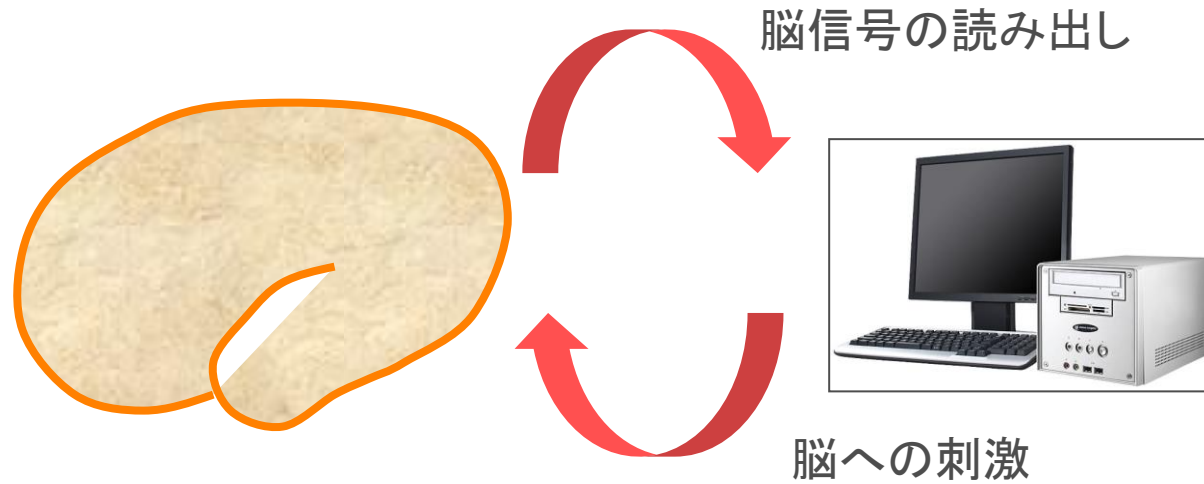
<https://www.youtube.com/watch?v=QRt8QCx3BCo>

Hochberg LR et.al, Nature. 2012 May 17; 485 (7398): 372-5. (Brown大学, cyberkinetics社)

# 講義内容

1. BMIとは
2. 運動出力型BMI
3. 刺激誘発型BMI
4. ATRにおけるBMI研究
5. その他の話題

脳信号の読み取り・脳への刺激によって脳(思考)と機械の直接的な情報伝達を仲介するプログラムや機器の総称。



## 脳への入力型

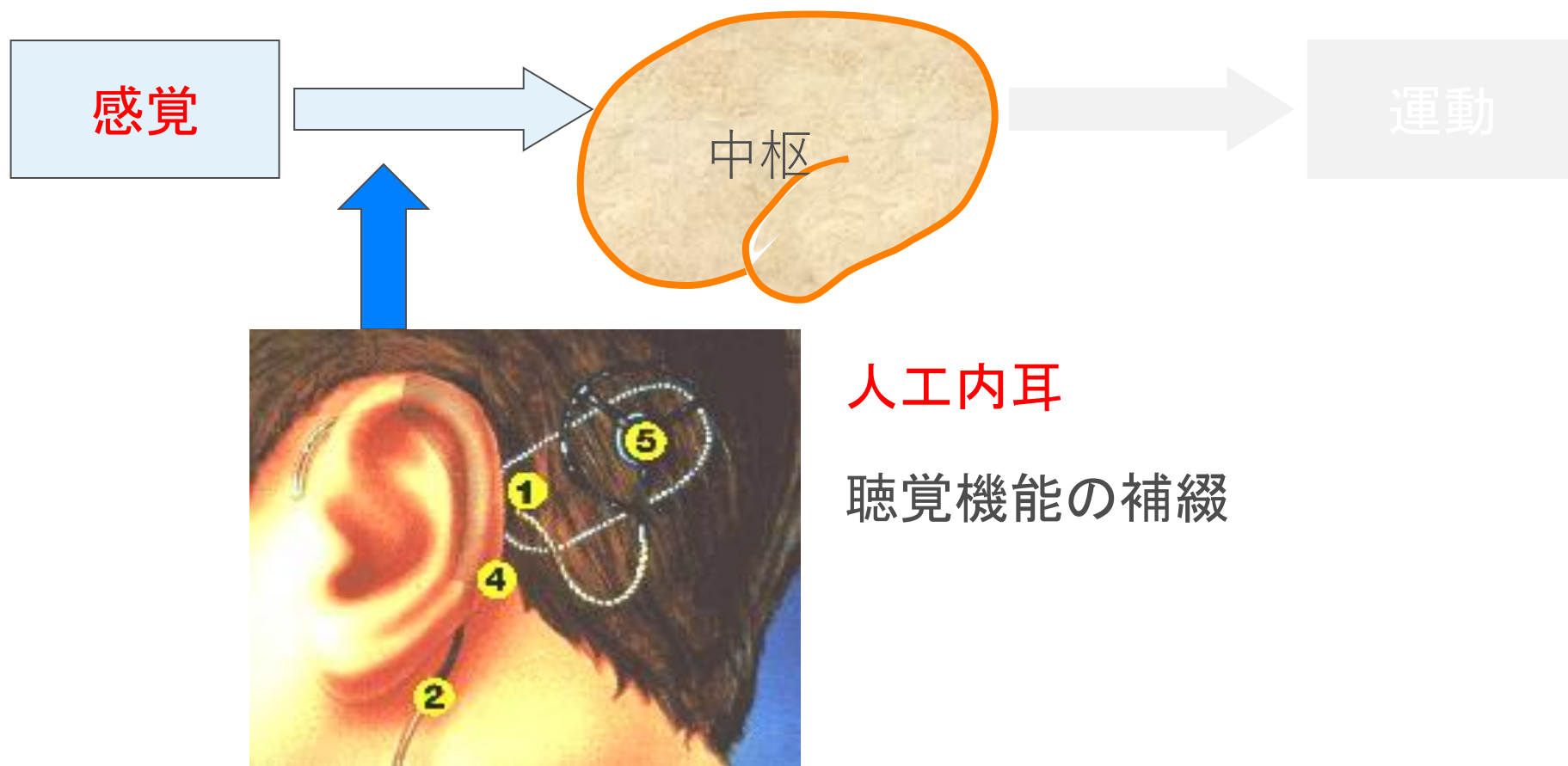
人工内耳、人工網膜、脳深部刺激  
(経頭蓋磁気刺激、経頭蓋電流刺激)

## 脳からの出力型

ロボット操作、コンピュータ操作

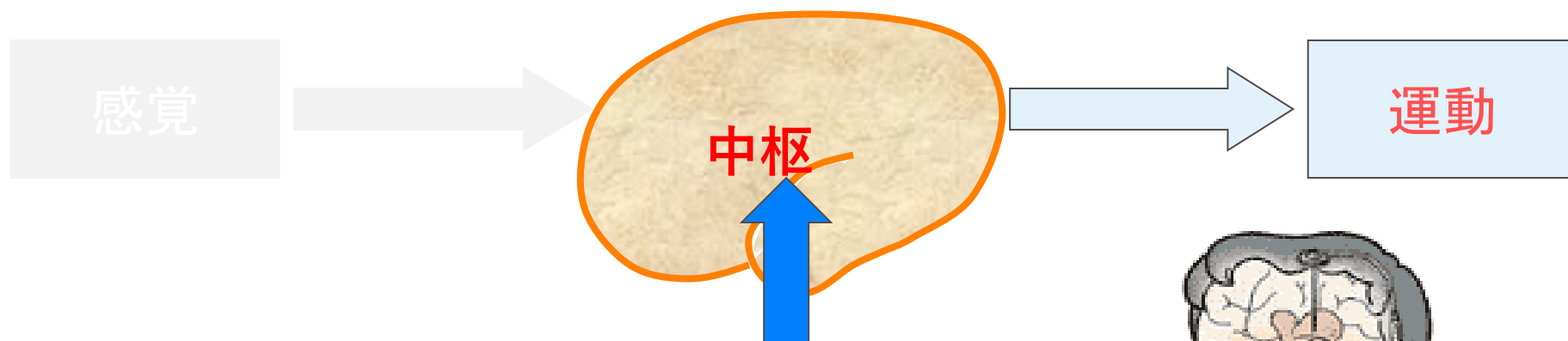
# 入力型ブレイン・マシン・インターフェース

脳信号の読み取り・**脳への刺激**によって脳(思考)と機械の直接的な情報伝達を仲介するプログラムや機器の総称。



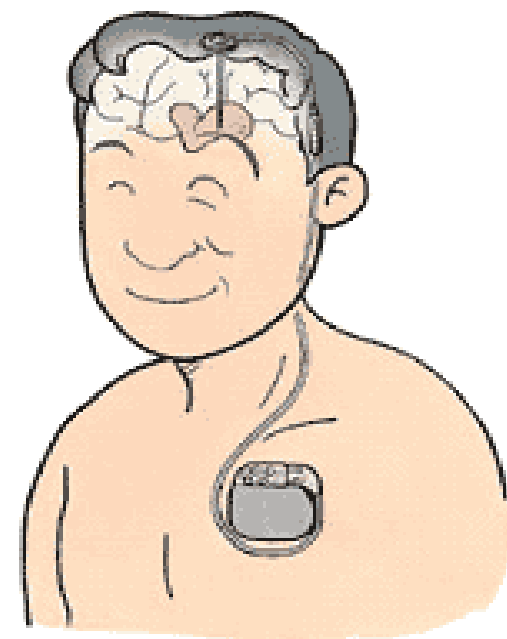
# 入力型ブレイン・マシン・インターフェース

脳信号の読み取り・**脳への刺激**によって脳(思考)と機械の直接的な情報伝達を仲介するプログラムや機器の総称。



**深部電流刺激(脳の奥深くを電気で刺激)**

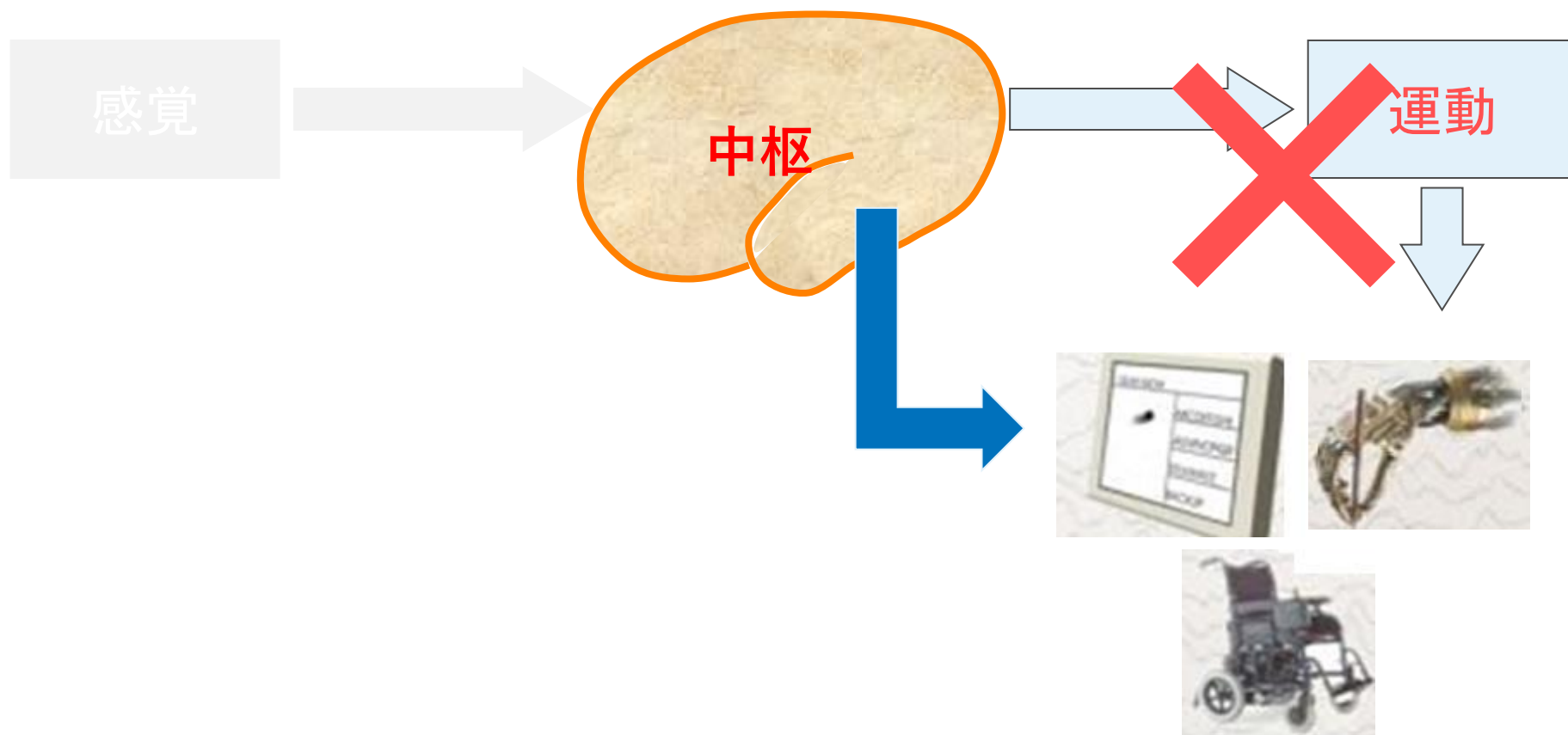
運動機能の制御





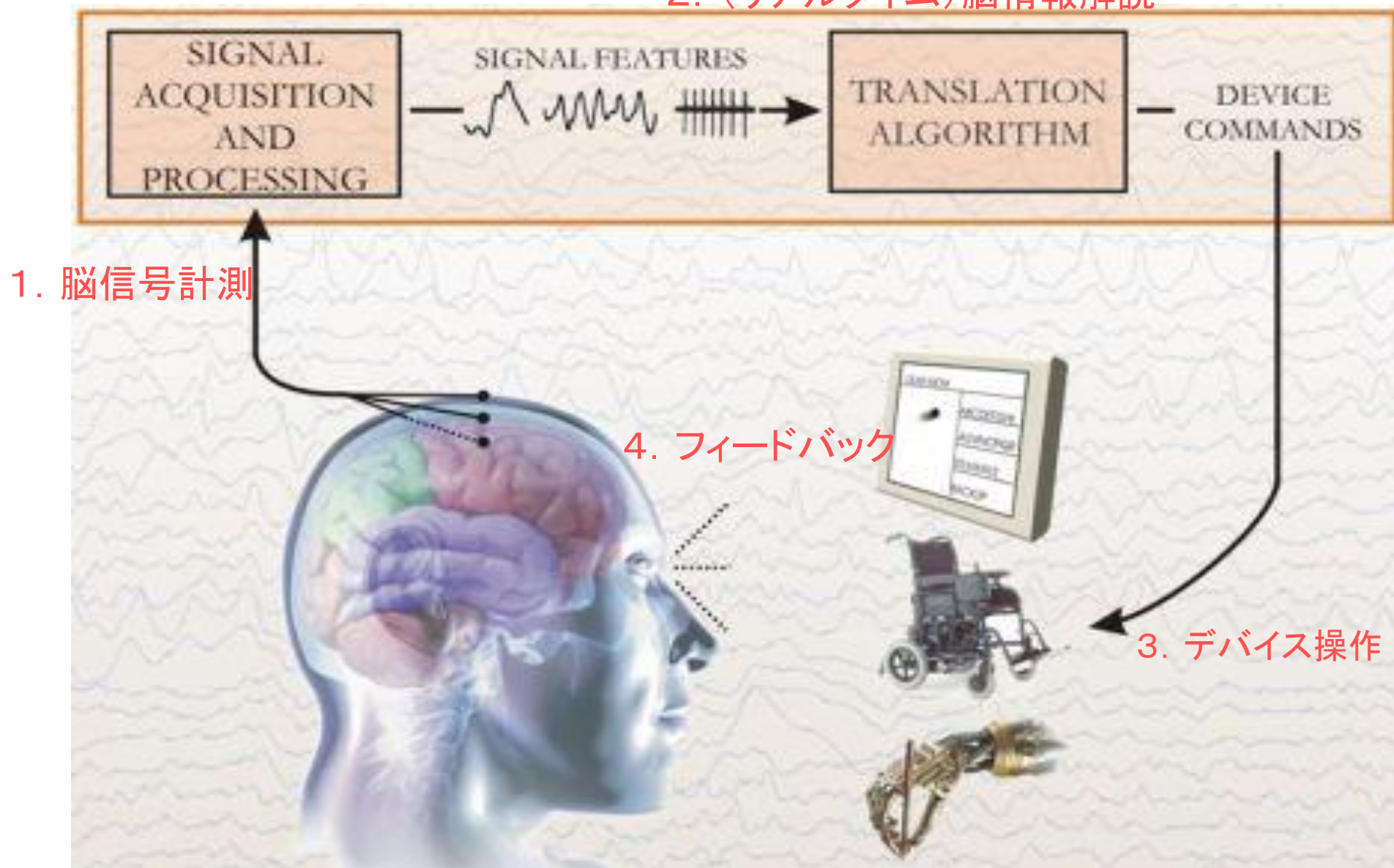
# 出力型ブレイン・マシン・インターフェース

脳信号の読み取り・脳への刺激によって脳(思考)と機械の直接的な情報伝達を仲介するプログラムや機器の総称。



# BMIの実装

## 2. (リアルタイム)脳情報解読



# BMIの実装：設計項目

## 1. 脳信号計測

- 脳計測装置
- 実験デザイン
- 情報表現: ポップレーション符号化、Event related de-synchronization

神経科学

## 2. 脳情報解読

- 信号処理
- 特徴抽出
- 機械学習

工学

情報科学

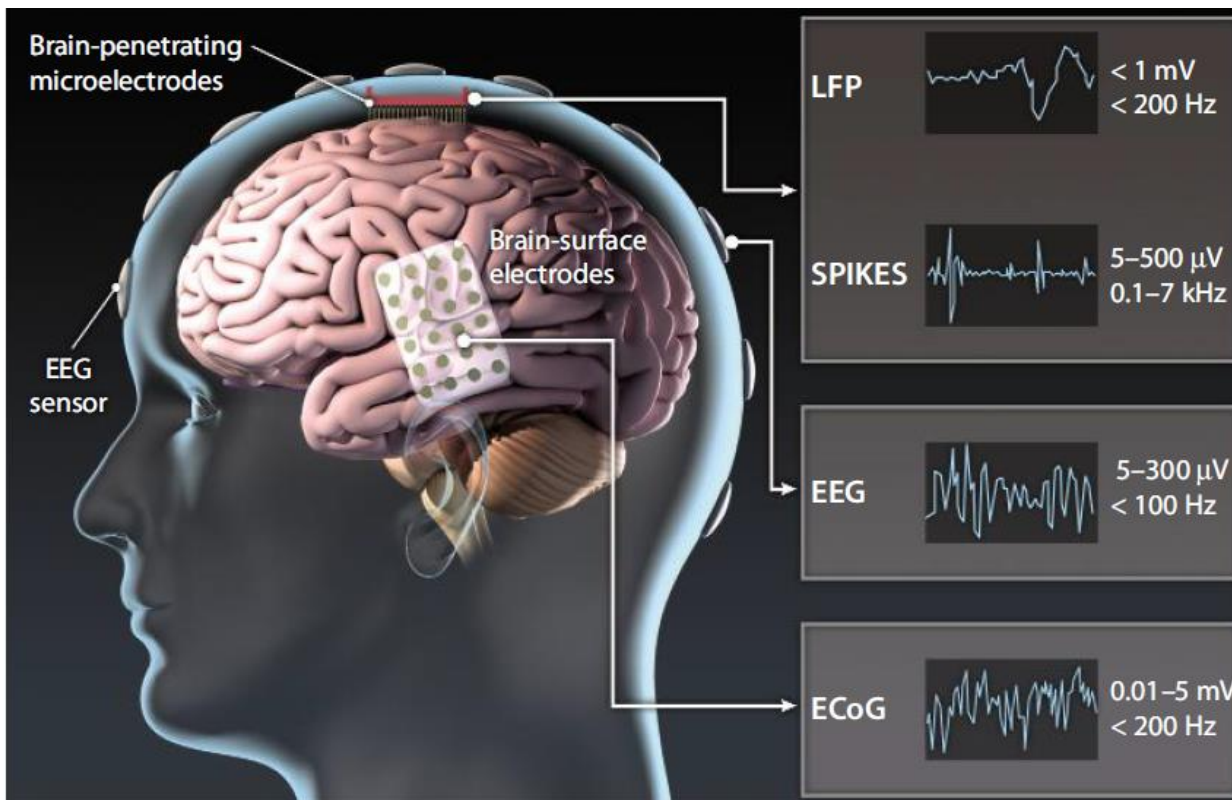
## 3. フィードバック

- ユーザ学習
- シナプス可塑性

神経科学

心理学

# BMIの実装：計測方法による分類

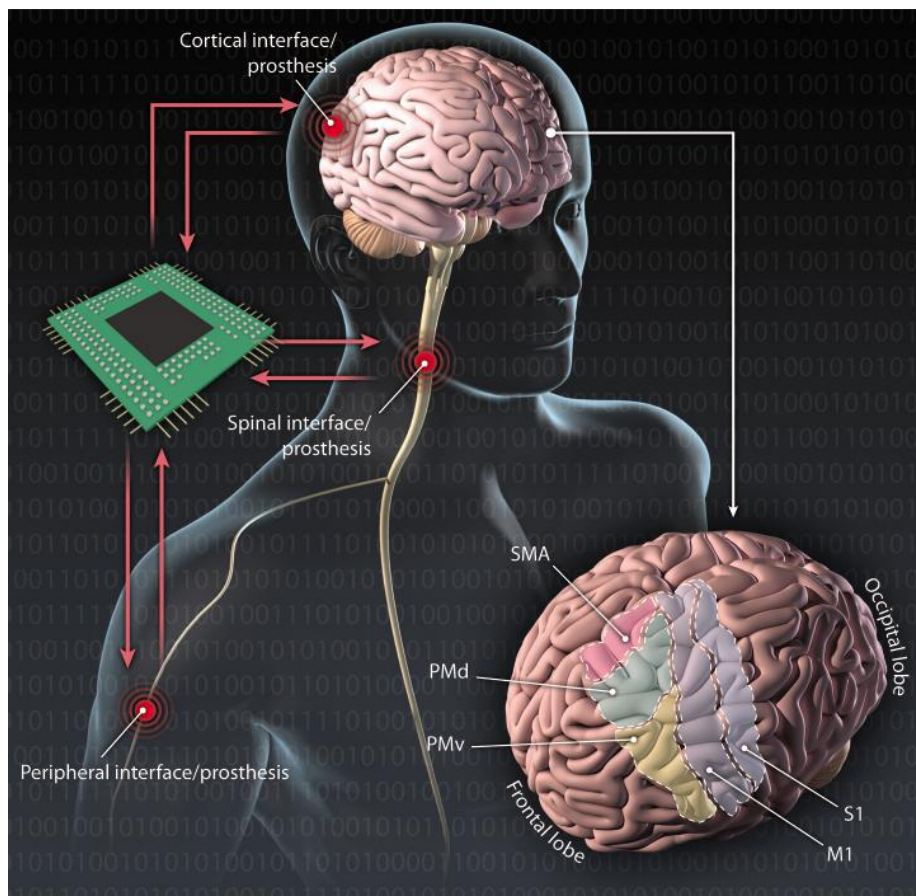


	安全性	脳情報量
侵襲型BMI	△	◎
非侵襲型BMI	◎	△
低侵襲型BMI	○	○

安全性と脳情報量のトレードオフ

# BMIの実装：実験パラダイムによる分類

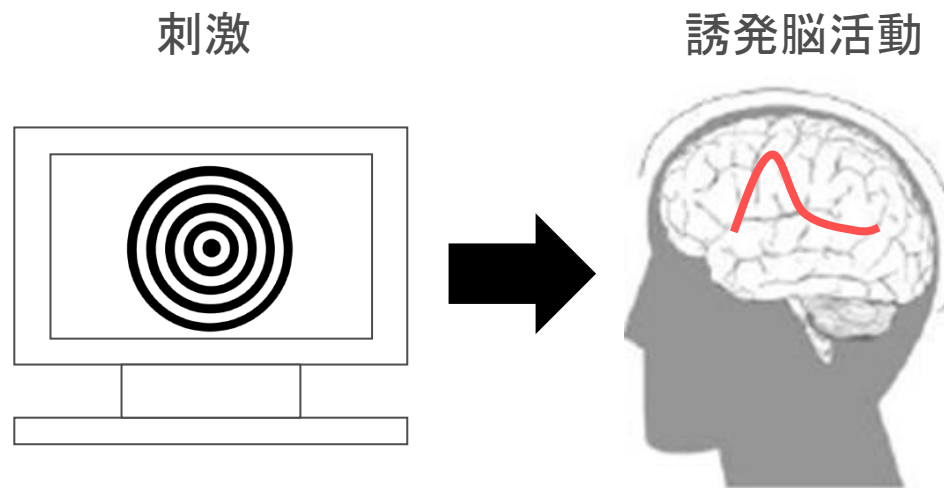
## 運動出力型



運動関連領野の脳活動から  
運動意図を読み取る

## 刺激誘発型

主に非侵襲BMI で利用



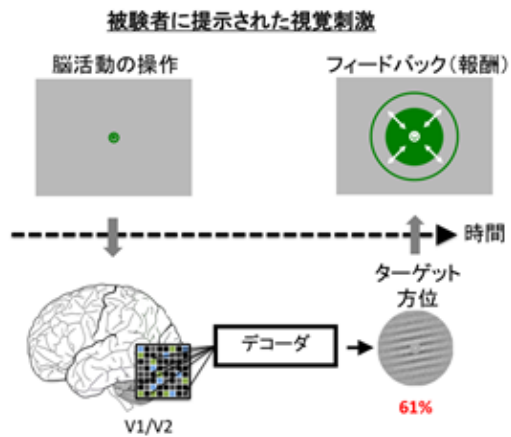
外部から与えた刺激に対する  
応答成分を読み取る

## 医療応用 機能代替・機能回復 (リハビリ)



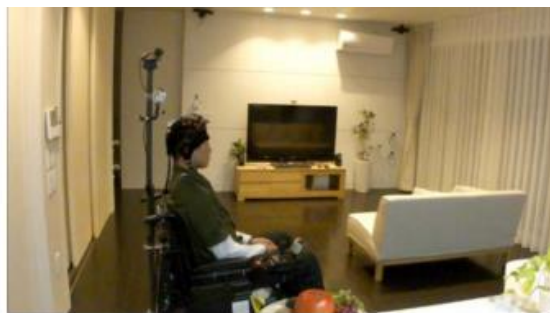
筋萎縮性側索硬化症  
パーキンソン病  
脳卒中

## 基礎神経科学



ニューロフィードバック、可塑性

## 民生応用



BMIハウス

## エンターテインメント



necomimi, ゆかい工学

# 講義内容

1. BMIとは

## 2. 運動出力型BMI

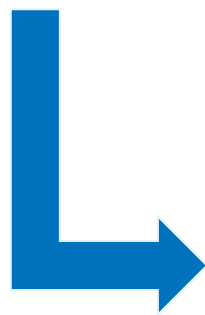
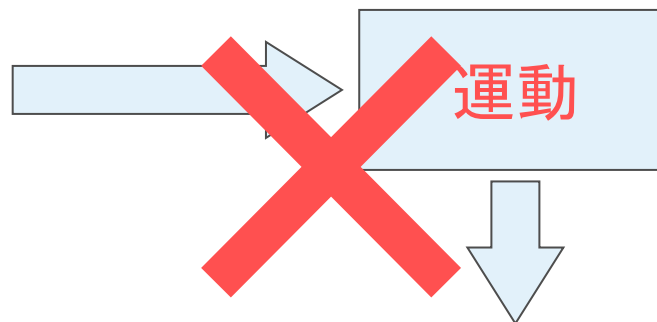
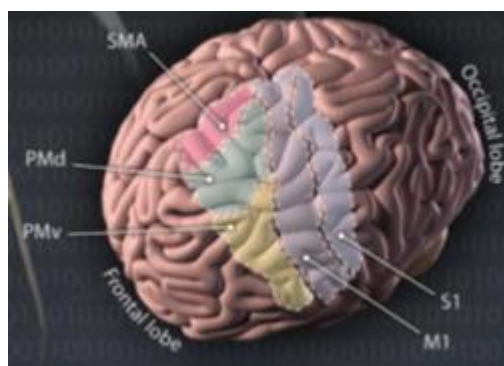
3. 刺激誘発型BMI

4. ATRにおけるBMI研究

5. その他の話題

# 運動出力型BMI

運動野や補足運動野などの運動意図や運動出力に関する脳信号を読み取りデバイスをコントロール。





# 運動出力型BMI研究

- 侵襲型計測 (刺入電極)

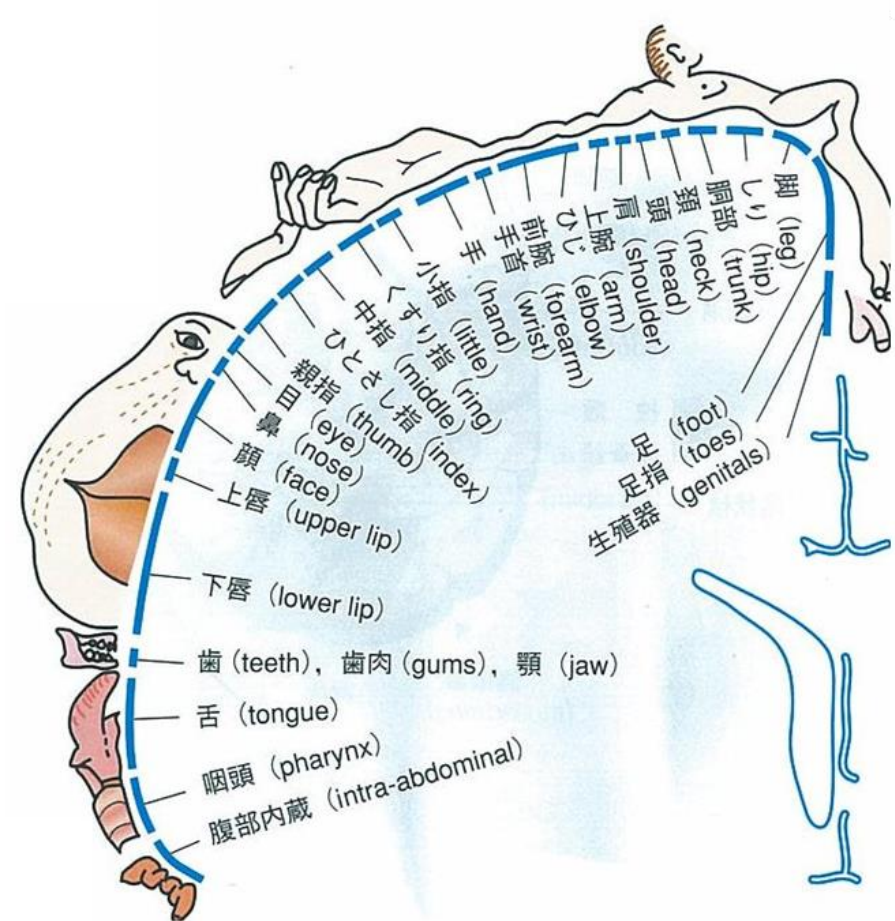
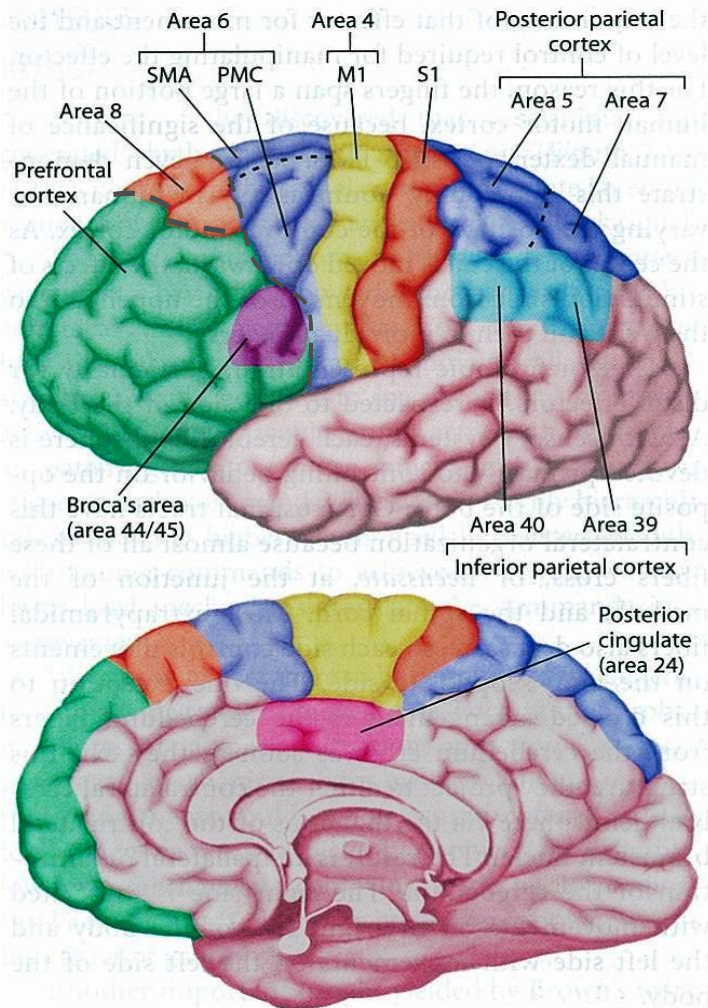
- サル、シングルニューロン、オペラント条件付、ハンドル操作 (Schmidt et al. 1980)
- ラット、マルチニューロン、オペラント条件付、レバー操作 (Chapin et al. 1999)
- ヨザル、マルチニューロン、ロボットアーム (Wessberg et al. 2000)
- ヒト(四肢麻痺)、マルチニューロン、2Dカーソル (Hochberg et al. 2006)
- ヒト(四肢麻痺)、マルチニューロン、ロボットアーム(リーチング、掌握) (Hochberg et al. 2012)
- ヒト(四肢麻痺)、マルチニューロン、キーボード操作 (Gilja et al. 2012, 2015, Pandarinath et al. 2017)

- 非侵襲計測 (脳波)

- レビューペーパー、1st Brain computer interface workshop (Wolpaw et al. 2000) New York州立大
- ヒト(脊損患者)、フィードバック訓練、2Dカーソル (Wolpaw and McFarland, 2004)
- ヒト、フィードバック訓練、車椅子 (Choi et al., 2008) Riken-Toyota
- ヒト、フィードバック訓練、脳卒中リハビリ (K.Shindo et al. 2011) 慶応大学
- ヒト、フィードバック訓練、ロボットハンド操作 (Meng et al. 2016) Minesota大学

ピンポンゲーム (Berlin University), バーチャルリアリティ (Graz University), セカンドライフ (Keio University), 車椅子 (Swiss Federal Institute of Technology, Riken-BSI-Toyota)、**ロボット操作 (Honda-ATR-Shimadzu)**

# 運動出力型BMIの原理

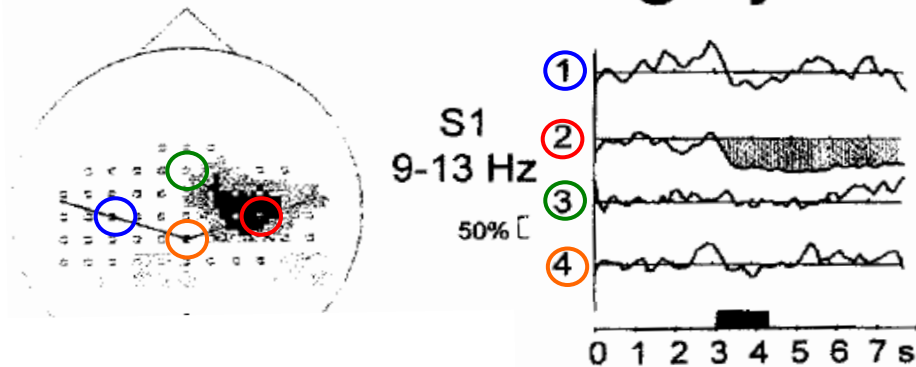


# Sensori-motor rhythmを用いた運動想像パラダイム

## Sensori-motor rhythm

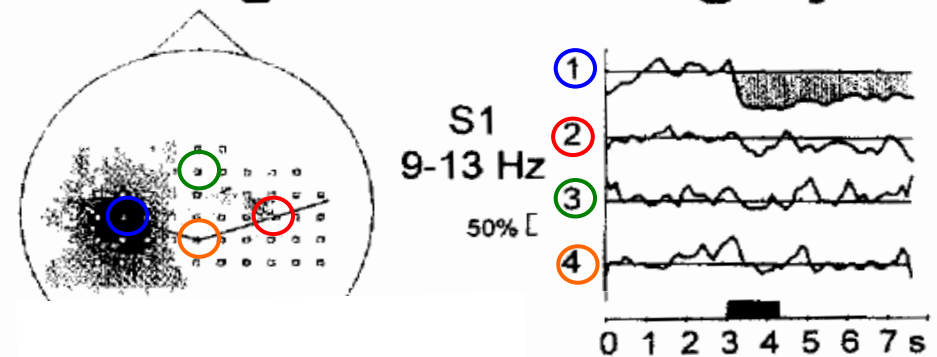
- 運動想像した体部位に依存して、脳波の振動成分が変動を示す。
- ミュー波(8-12Hz), ベータ波(15-30Hz)の減衰  
(Event Related Desynchronization, ERD)

### 2 Left Motor Imagery



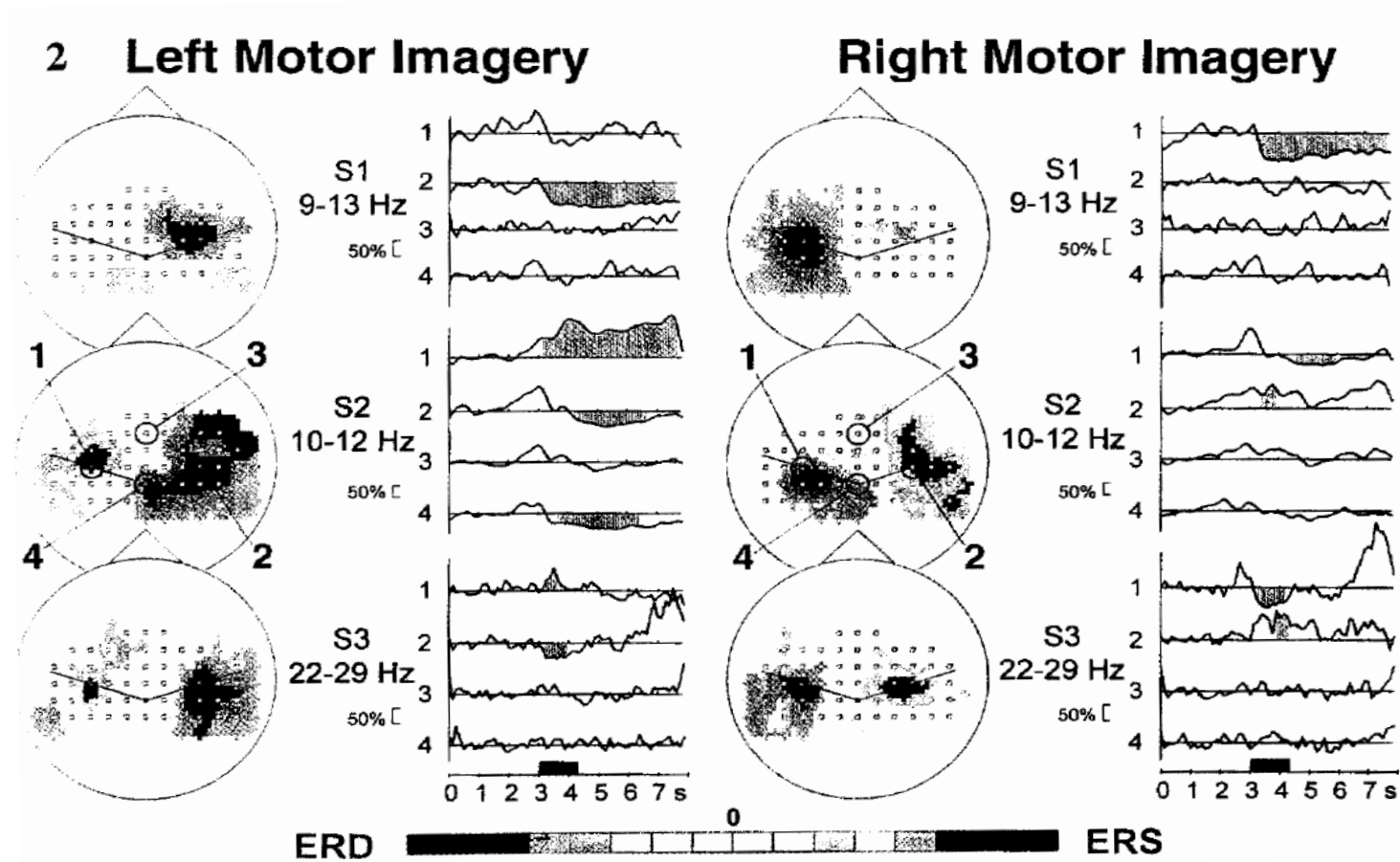
右側のセンサが反応

### Right Motor Imagery

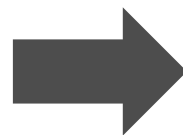


左側のセンサが反応

# Sensori-motor rhythmを用いた運動想像パラダイム



個人ごとに周波数や活動位置、活動強度が異なる。



個人ごとに判別ルールを学習する必要性。  
デコーダ学習サンプル計測のための  
**キャリブレーション実験。**

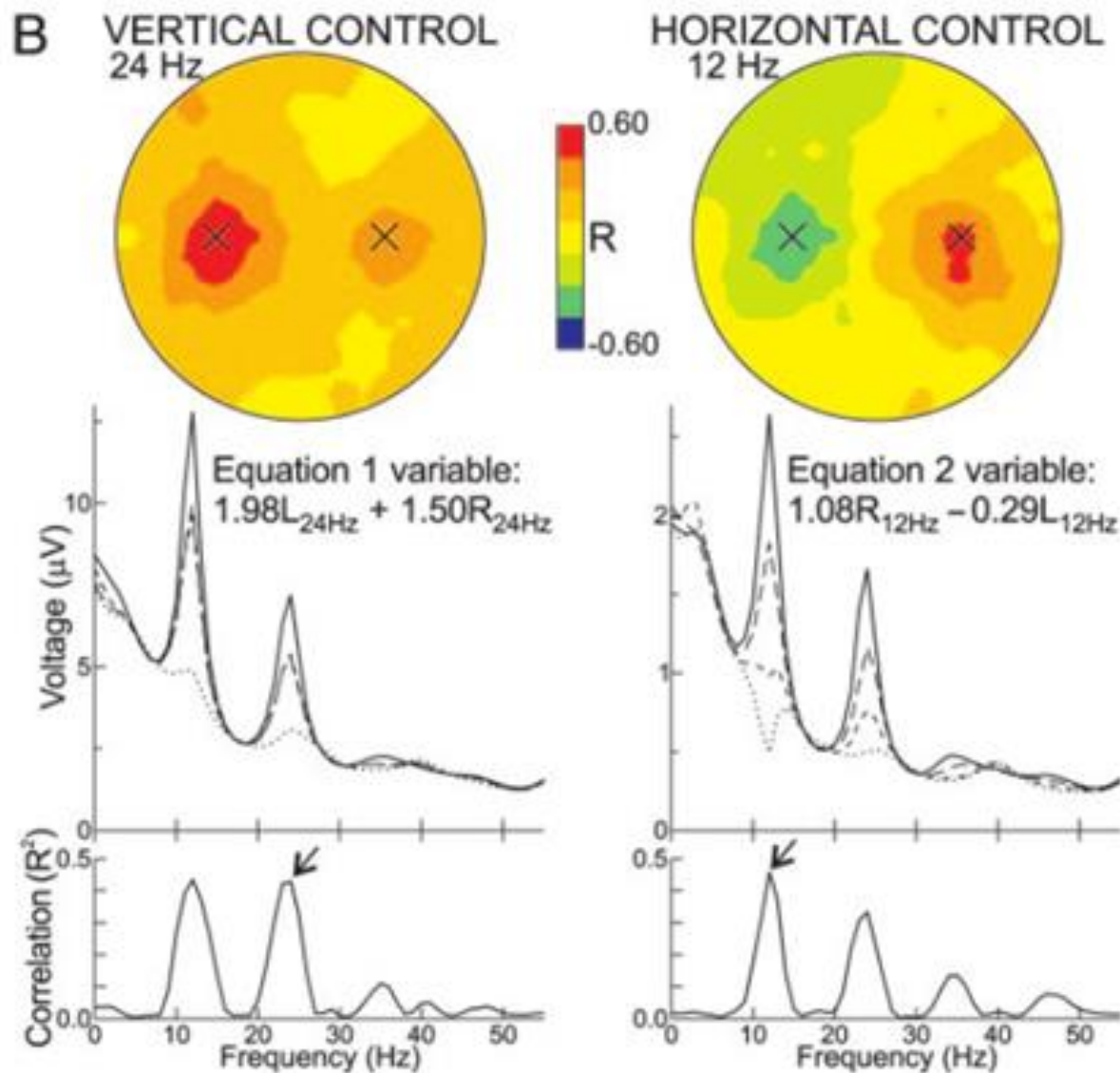
# 脳波を用いたBMI事例 1 : 2Dカーソル操作

脊椎損傷患者のBMI臨床試験。2Dカーソル操作。  
長期訓練によりSensory-motor rhythmを意図的にコントロール。

週 2~4回, 計68セッションの訓練, Hit rate 90%程度



# 脳波を用いたBMI事例 1 : 2Dカーソル操作



上 : 24Hzパワーを左右ともに +  
下 : 24Hzパワーを左右ともに -  
右 : 12Hzパワーを右 + 左 -  
左 : 12Hzパワーを右 - 左 +

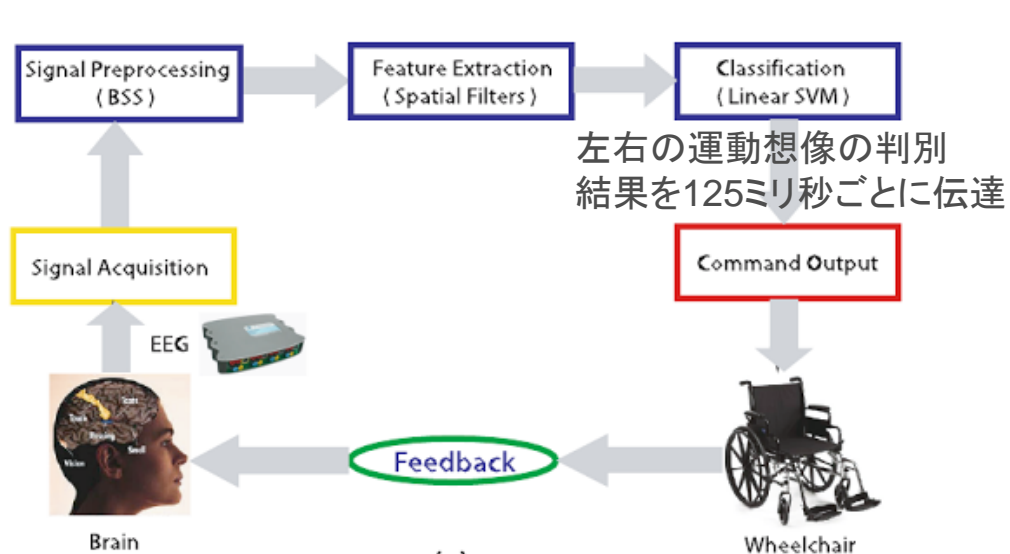
重みは オンライン最小二乗法  
により適応的に調整

## 脳波を用いたBMI事例 2 : 車椅子操作

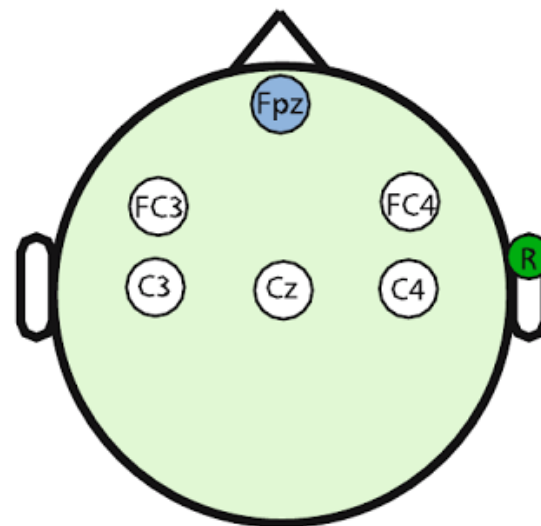


Riken-Toyoda, 2009, by courtesy of Dr.Choi

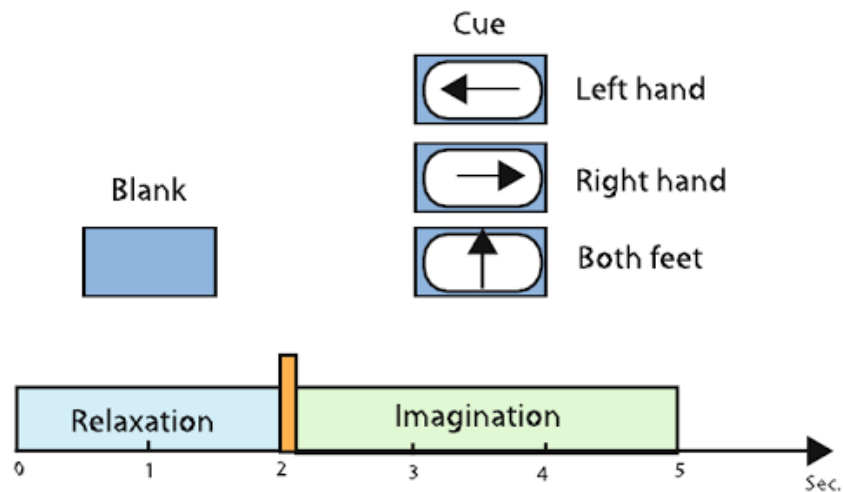
# 脳波を用いたBMI事例 2 : 車椅子操作



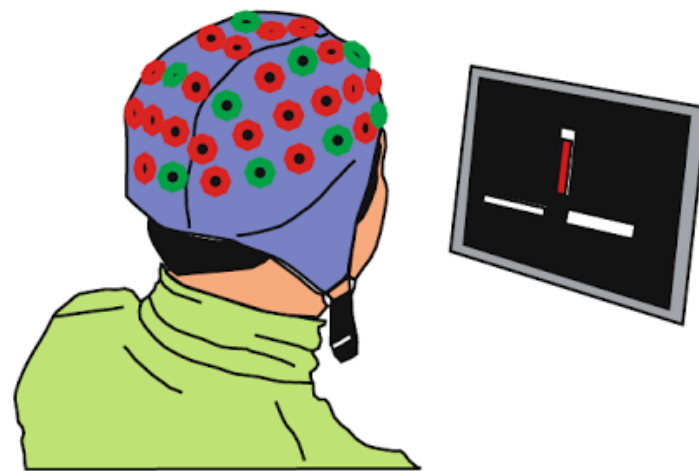
(a)



(b)



(c)

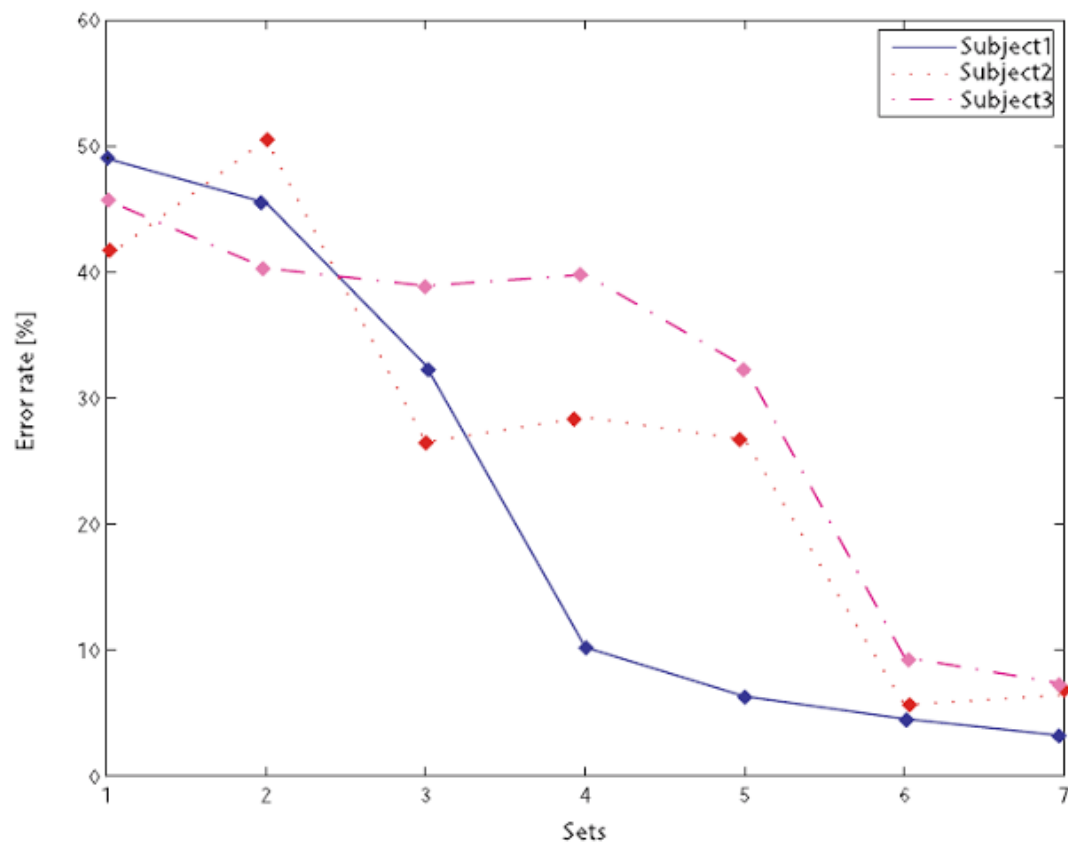


(d)



# 脳波を用いたBMI事例 2 : 長期フィードバック訓練の効果

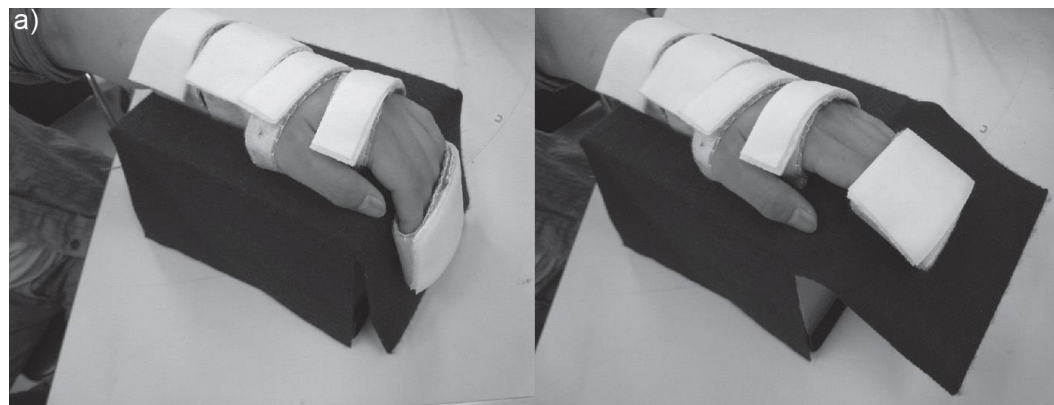
右手、左手、足の3択  
Visual feedbackありの訓練



(a)

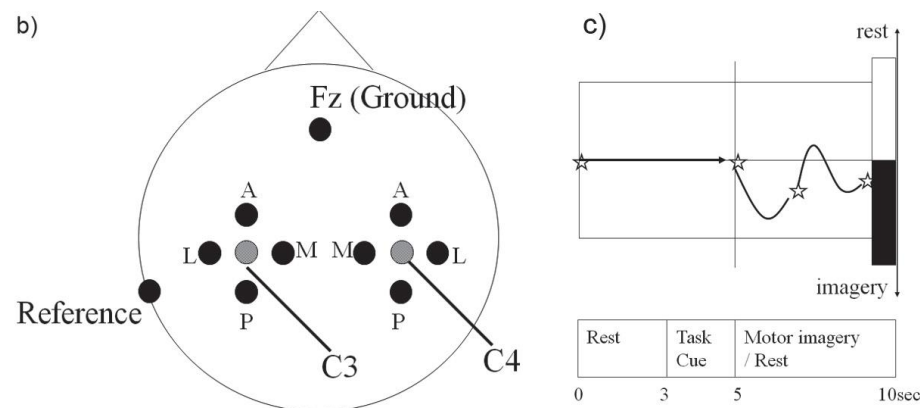
# 脳波を用いたBMI事例3：脳卒中のリハビリテーション（慶応義塾大）

麻痺側のBMI制御を繰り返すと、リハビリテーション効果により筋電制御が向上。  
脳卒中により重度な運動機能障害を持った患者に効果。



neutral

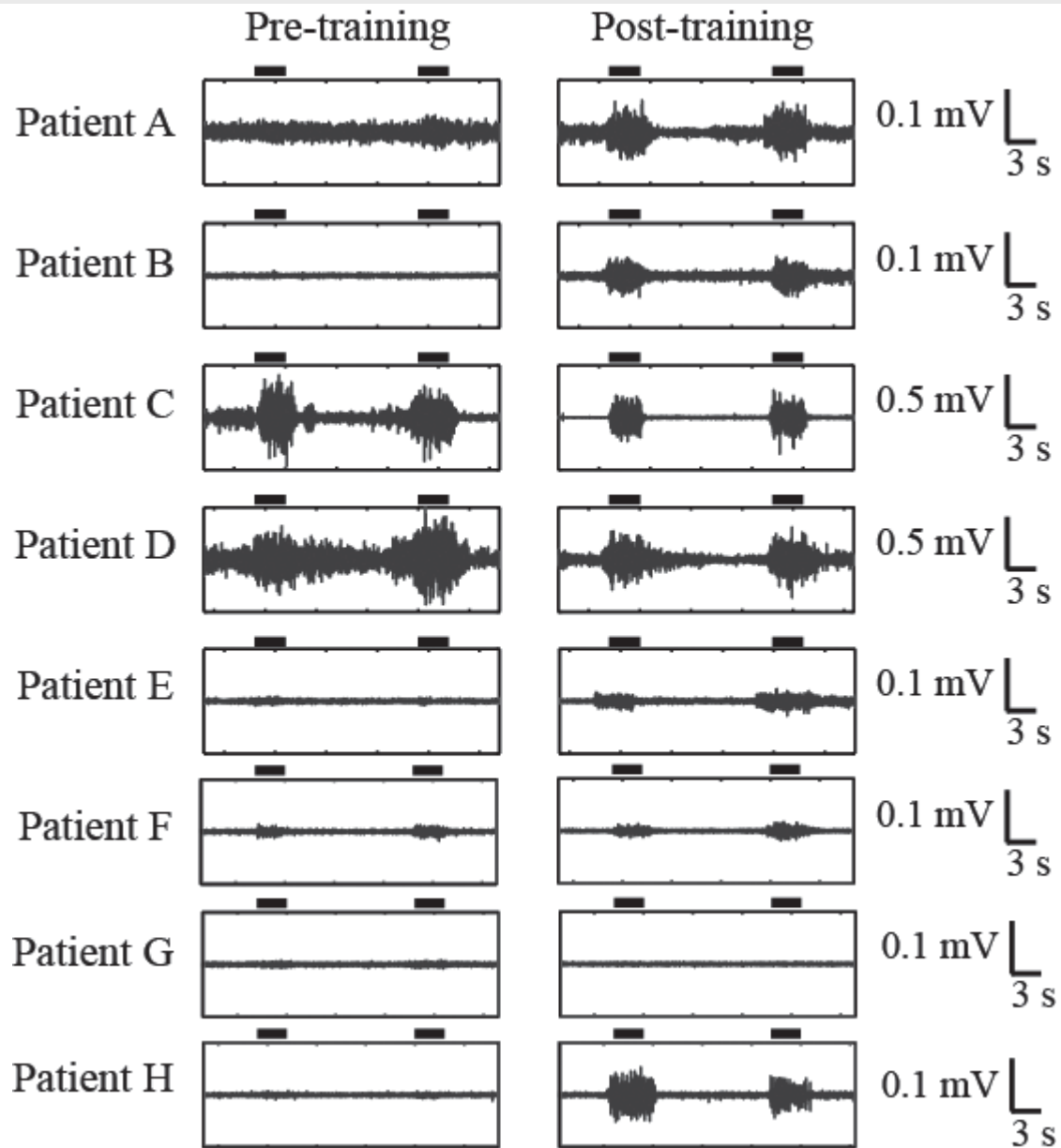
open



mu波のERDからRestかImageryを判定

週1～2回、1時間、4～7か月計12～20回の訓練

# 脳波を用いたBMI事例3：脳卒中のリハビリテーション（慶応義塾大）



# 問題点 : 運動想像型 BMI を使いこなせるユーザは限定されている

## 運動想像 (キャリブレーション実験6分、双極2ch)

**Table 2**

Percentage of sessions which were classified with a certain accuracy for motor imagery classified with the rls algorithm or band power (bp) estimation. *n* specifies the number of subjects.

Classification accuracy in %	RLS + BP percentage of sessions (N = 99)
90–100	6.2
80–89	13.0
70–79	32.1
60–69	42.0
50–59	6.7

長期訓練で誰もが操作可能になるかは不明？

# キネマティックパラダイム

連続的運動想像に伴う脳活動を利用。直感的操作・少ない訓練負担。

J. Neural Eng. 8 (2011) 036010 (9pp)

doi:10.1088/1741-2560/8/3/036010

## Fast attainment of computer cursor control with noninvasively acquired brain signals

Trent J Bradberry<sup>1,4,5</sup>, Rodolphe J Gentili<sup>2,3</sup> and José L Contreras-Vidal<sup>1,2,3,5</sup>

デコーダ学習用データ取得実験では、カーソルの動きを観察しながら想像する。



### カーソル操作実験



$$x[t] - x[t - 1] = a_x + \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^L b_{nkx} S_n[t - k] \quad (1)$$

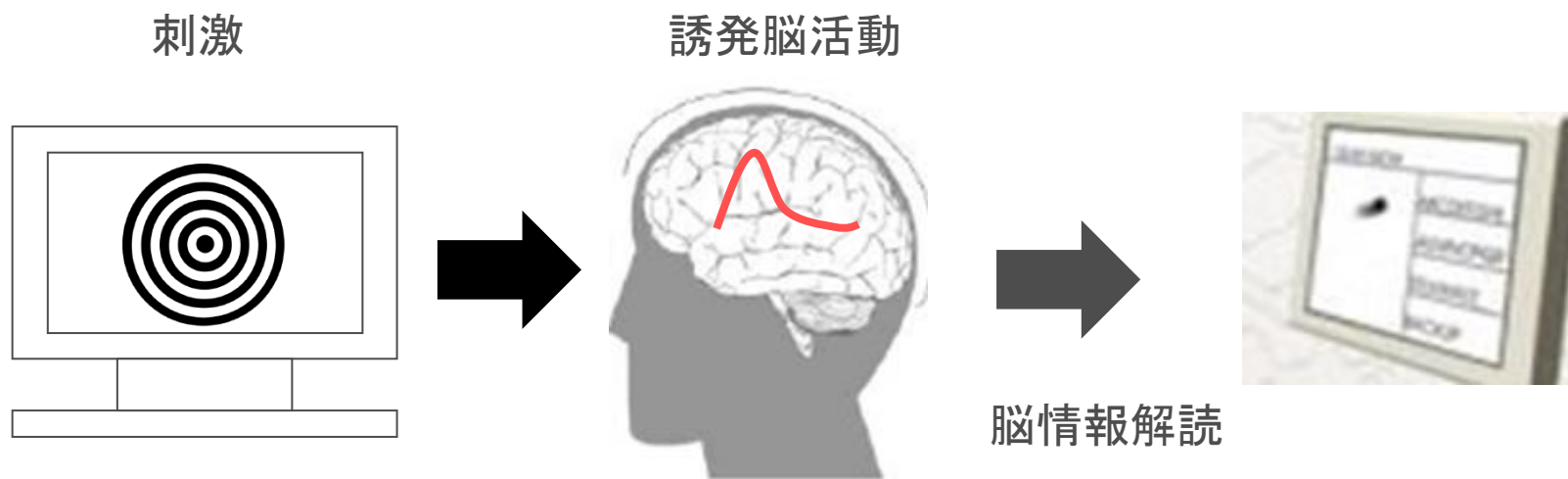
$$y[t] - y[t - 1] = a_y + \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^L b_{nky} S_n[t - k], \quad (2)$$

1Hz以下の遅い脳活動  
(34チャンネル)

# 講義内容

1. BMIとは
2. 運動出力型BMI
- 3. 刺激誘発型BMI**
4. ATRにおけるBMI研究
5. その他の話題

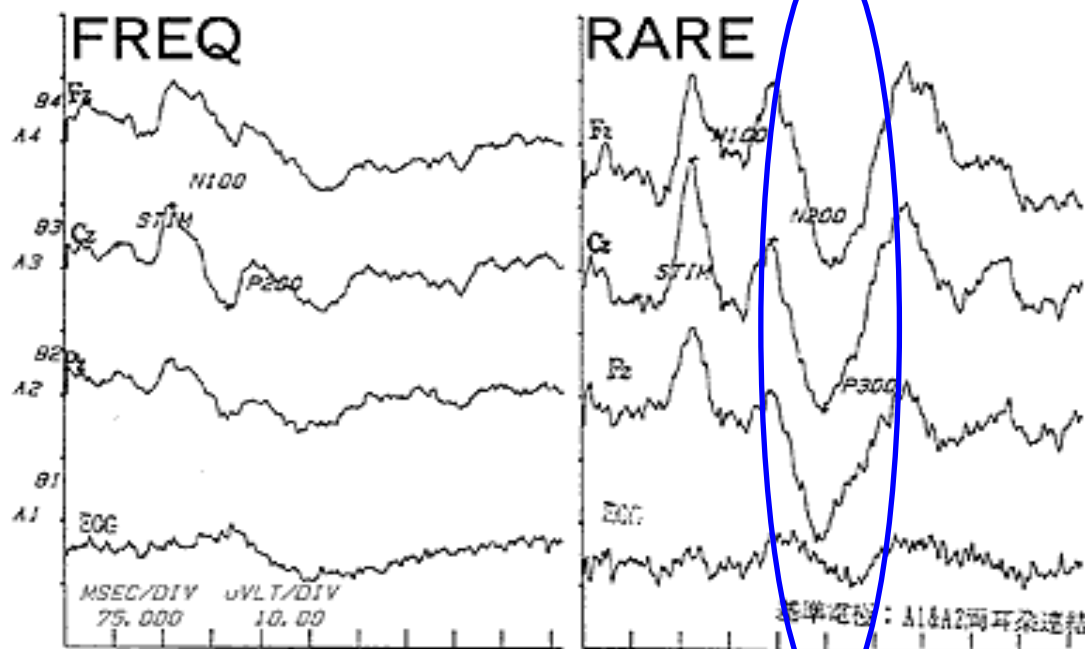
## 刺激により誘発される脳波成分を脳情報解読



- P300
- 定常視覚刺激

# オッドボール課題 (P300パラダイム) の原理

識別可能な2つ以上の感覚刺激をランダムに提示し、低頻度の刺激に選択的注意を向けさせると、潜時300ミリ秒あたりに頭頂付近で陽性電位が観測される。



P300成分

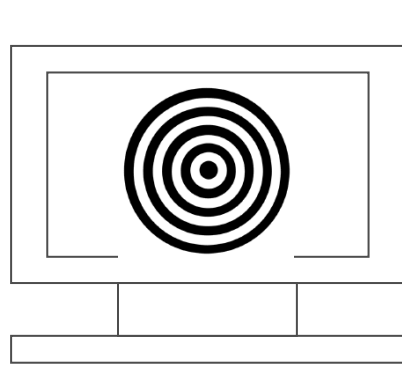




<https://www.youtube.com/watch?v=wKDimrzvwYA>

# 定常視覚刺激 (Steady-state visual evoked potential) の原理

ある周波数で点滅する視覚刺激に注意を向けると、同じ周波数の脳波が視覚野に観察される

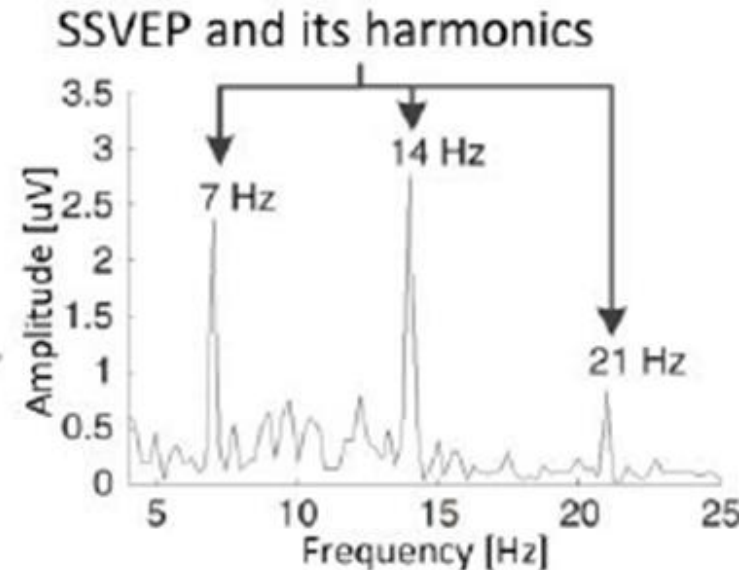


7Hzで点滅



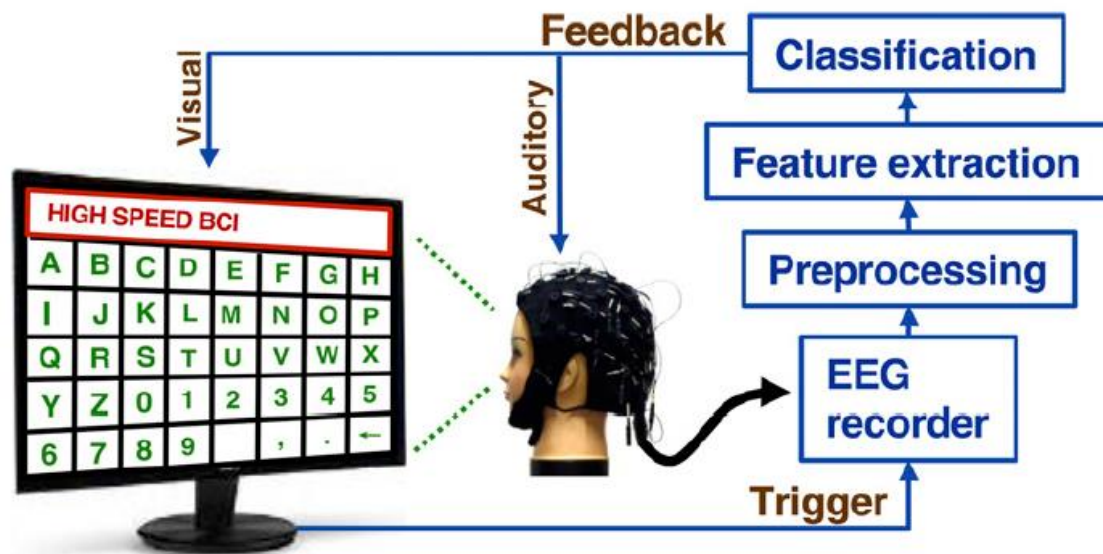
EEG Signal

FFT



# 超高速定常視覚刺激スペラー

A



B

HIGH SPEED BCI							
8.0 0.0	9.0 1.75	10.0 1.50	11.0 1.25	12.0 1.0	13.0 0.75	14.0 0.50	15.0 0.25
8.2 0.35	9.2 0.10	10.2 1.85	11.2 1.60	12.2 1.35	13.2 1.10	14.2 0.85	15.2 0.60
8.4 0.70	9.4 0.45	10.4 0.20	11.4 1.95	12.4 1.70	13.4 1.45	14.4 1.20	15.4 0.95
8.6 1.05	9.6 0.80	10.6 0.55	11.6 0.30	12.6 0.05	13.6 1.80	14.6 1.55	15.6 1.30
8.8 1.40	9.8 1.15	10.8 0.90	11.8 0.65	12.8 0.40	13.8 0.15	14.8 1.90	15.8 1.65

Legend: Freq. (Hz) (red text), Phase ( $\pi$ ) (green text)

点滅パターンの工夫と個人にカスタマイズした判別機により  
**最大1分に60文字**入力可能  
(参考: スマホ入力の平均が125文字/分程度)

# 運動型 vs. P300, 定常視覚刺激 長所・短所

	長所	短所
運動想像	○ 自発的な操作が可能	X 操作出来る人が限定されている X 長期間の訓練が必要
P300 定常視覚刺激	○ 初心者でも高い操作性 ○ 選択肢の多さ	X 視覚刺激装置が必要 X 目が疲れる

## P300 (訓練5分、8ch)

**Table 1**

Percentage of sessions which were classified with certain accuracy. *n* specifies the number of subjects participating.

Classification accuracy in %	Row-column speller: percentage of sessions (N=81)	Single character speller: percentage in sessions (N=38)
100	72.8	55.3
80-100	88.9	76.3
60-79	6.2	10.6
40-59	3.7	7.9
20-39	0.0	2.6
0-19	1.2	2.6
Mean accuracy of all subjects	91.0	82.0
Spelling time [s]	28.8	54
Mean accuracy of subjects who participated in RC and SC (N=19)	85.3	77.9

## 運動想像 (訓練6分、双極2ch)

**Table 2**

Percentage of sessions which were classified with a certain accuracy for motor imagery classified with the rls algorithm or band power (bp) estimation. *n* specifies the number of subjects.

Classification accuracy in %	RLS + BP percentage of sessions (N=99)
90-100	6.2
80-89	13.0
70-79	32.1
60-69	42.0
50-59	6.7

# 講義内容

1. BMIとは

2. 運動出力型BMI

3. 刺激誘発型BMI

**4. ATRにおけるBMI研究**

5. その他の話題

# ATRオープンハウス2007のデモ

## 脳とコンピュータをつなぐインタフェース

—考えただけでコンピュータを動かす技術とは？—  
Brain Network Interface Using NIRS and EEG

脳情報研究所

### ■ あなたの脳活動信号を使ってゲームをしよう！



「右手を動かす」、「左手を動かす」という動作(またはイメージ)の脳活動を近赤外線光計測(NIRS)と脳波計(EEG)で計測し、その活動状況を解析することで、コンピュータを動かします。

- 考えただけでコンピュータを動かすには、少し訓練が必要となります。そこで、体験デモでは実際に手を動かした強い脳活動信号を利用します。
- 脳波計は頭髮が汚れるので、NIRSだけを体験して頂きます。

### ■ 全体の仕組み



### ■ 将来

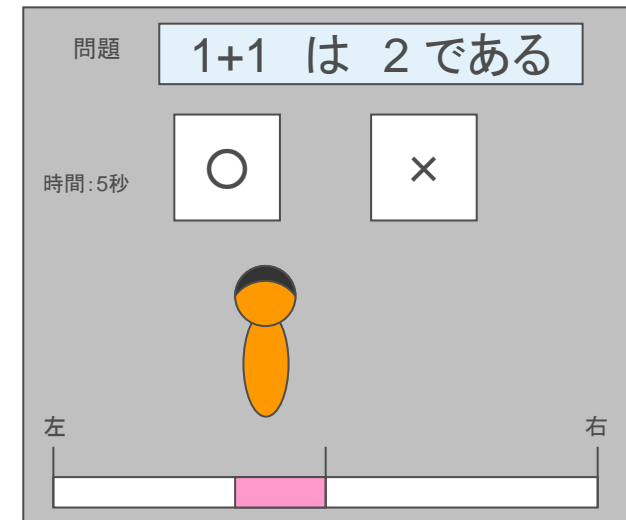
脳計測装置、コンピュータ解析の高性能化を測り、より複雑な作業を考えただけで行えるような新しいインタフェース技術を目指します。

## ATR被験者によるデモ

左手・右手の運動想像課題。  
EEG-NIRS同時計測。  
アバターを操作しクイズに回答。

### 一般被験者体験型

左手・右手の掌握運動課題。  
NIRS計測。  
アバターを操作しクイズに回答。

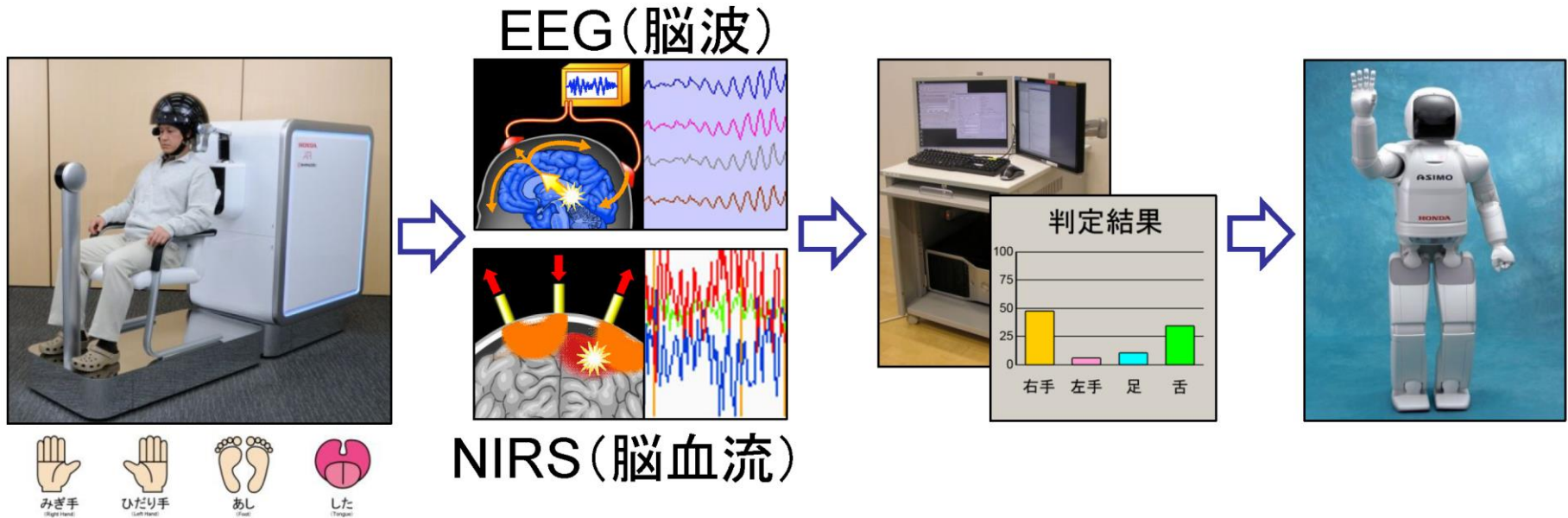




# 2009年 Honda-ATR-Shimadzu EEG-NIRS BMIによるアシモ操作

2009年03月31日

Honda、ATR、島津製作所が共同で、考えるだけでロボットを制御するBMI技術を開発



<https://www.honda.co.jp/news/2009/c090331.html>

- 運動想像4択 90% 以上の正答率
- 信号処理の工夫
- × 遅い応答

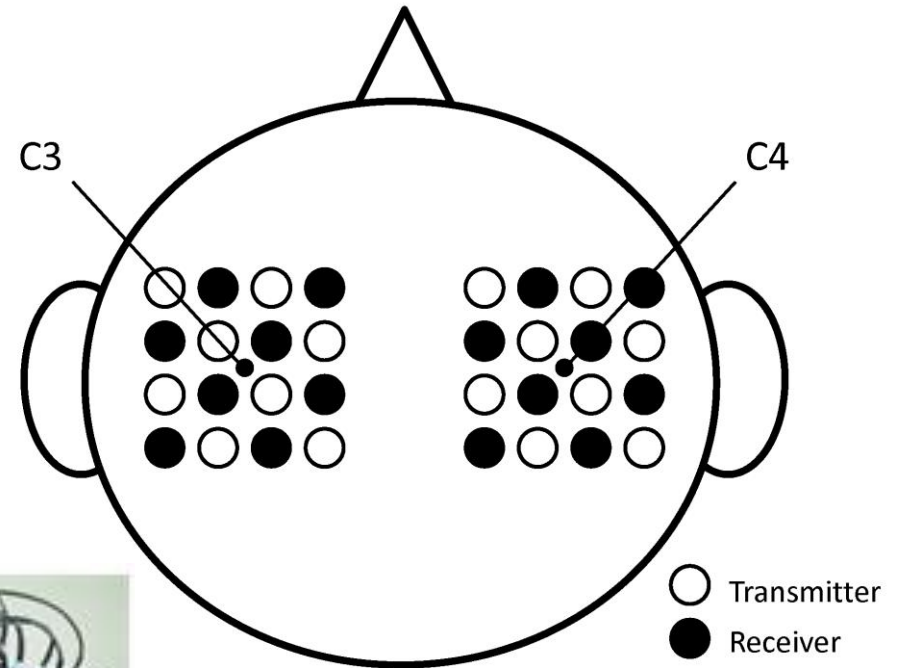
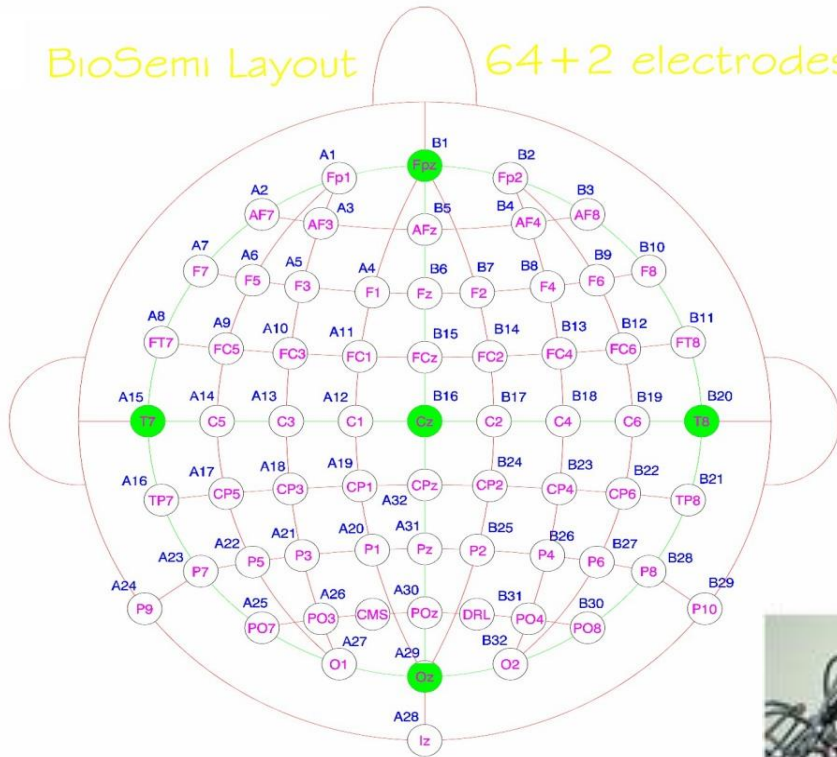


# EEG-NIRS BMI : 同時計測

EEG : Active two (Biosemi社),  
64ch, 全頭, 256Hz

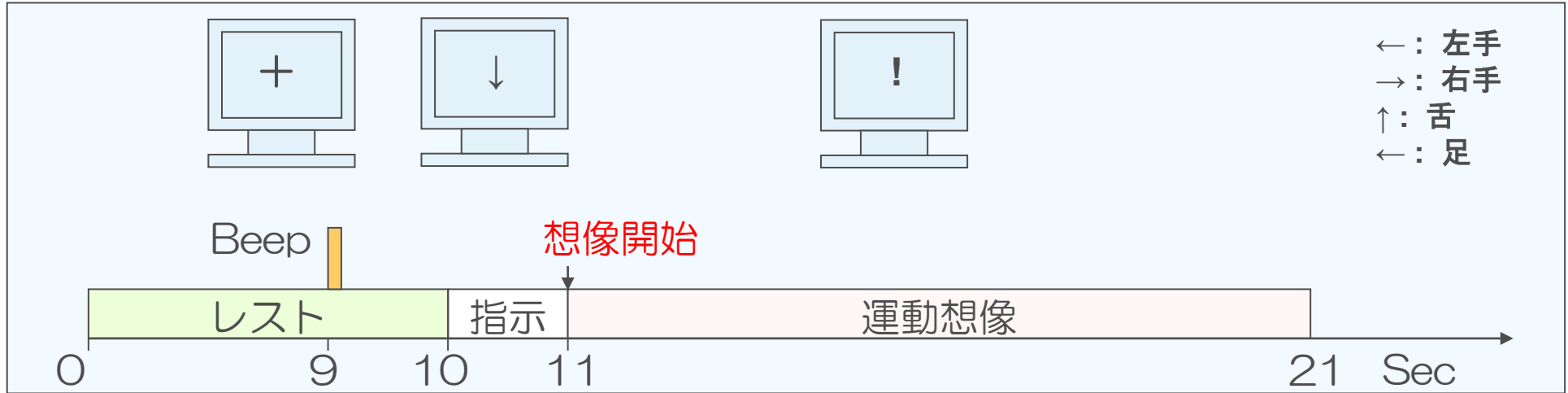
NIRS : FOIRE300(Shimadzu),  
48ch, 運動野, 7.7Hz

BioSemi Layout 64+2 electrodes

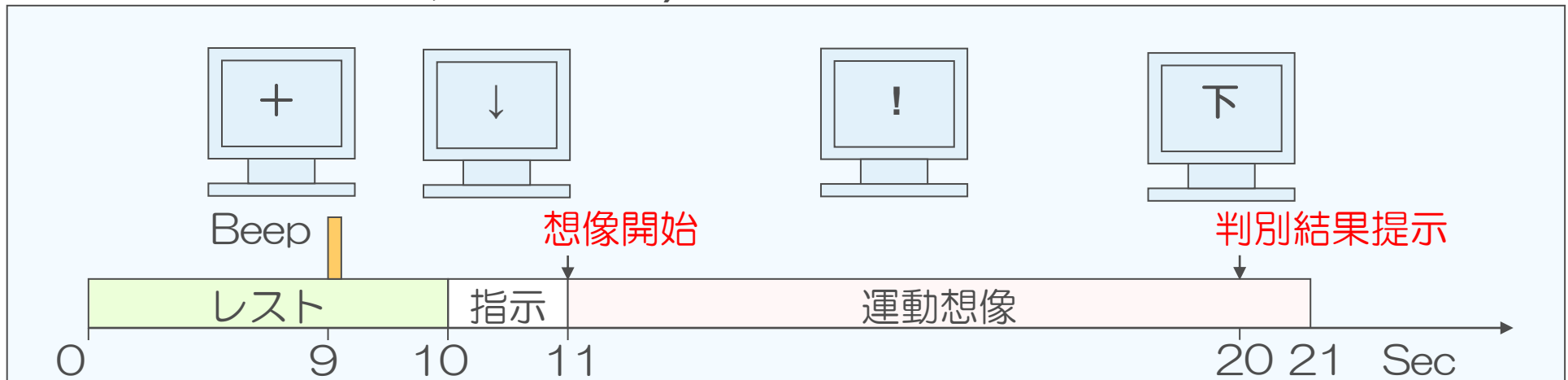


# EEG-NIRS BMI : 実験デザイン

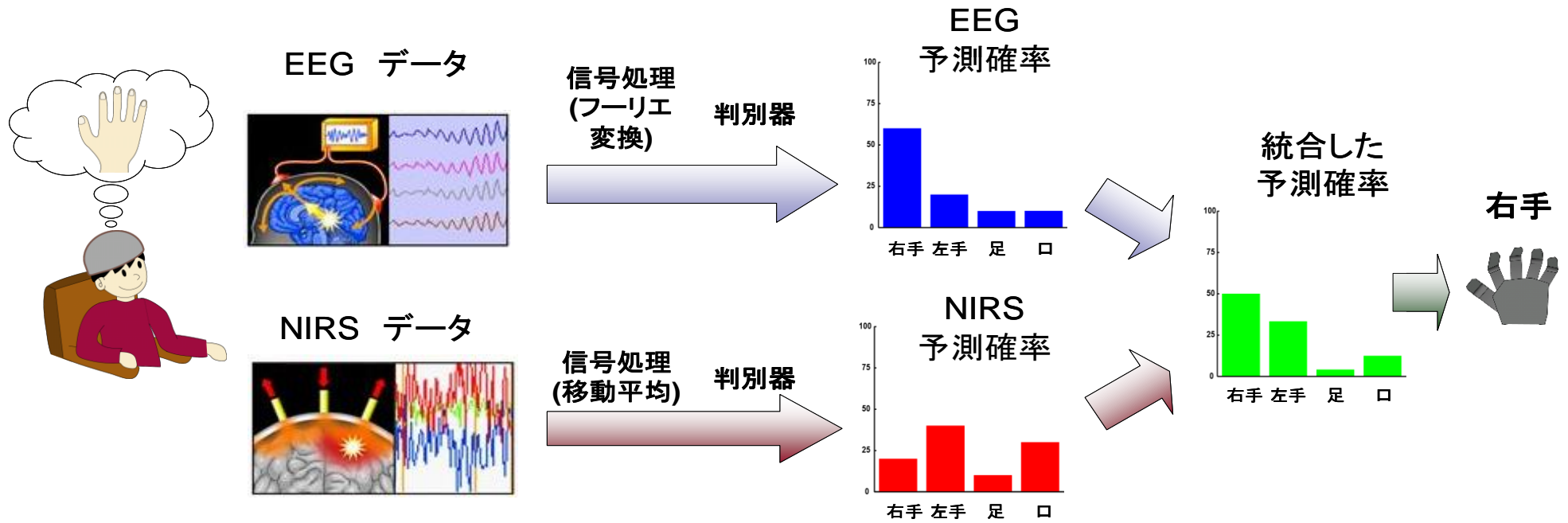
## キャリブレーション実験 (100分, 70試行/条件)



## フィードバック実験 (50分, 35試行/条件)



# EEG-NIRS BMI : 判別手法 - 判別結果の確率的統合



- EEGデータ判別

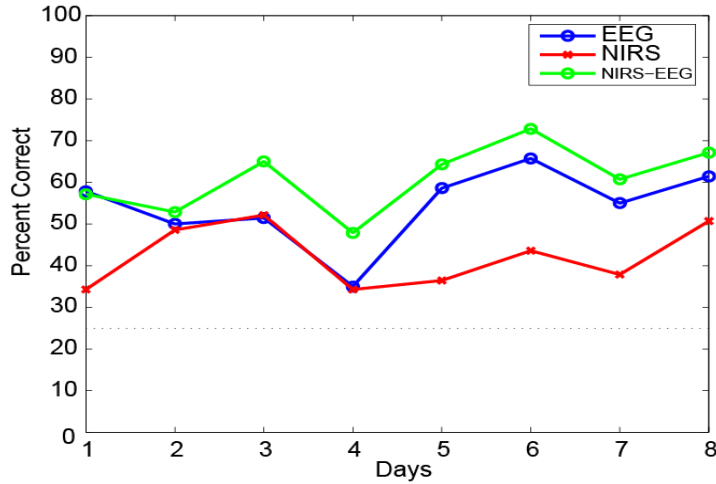
1. common average reference
2. baseline adjustment
3. bandpass filter  
(7~9Hz, 8~10Hz, ..., 26~28Hzの20種類)
4. time averaged power
5. channel selection
6. Sparse logistic regression  
(one-versus-others binary scheme)

- NIRSデータ判別

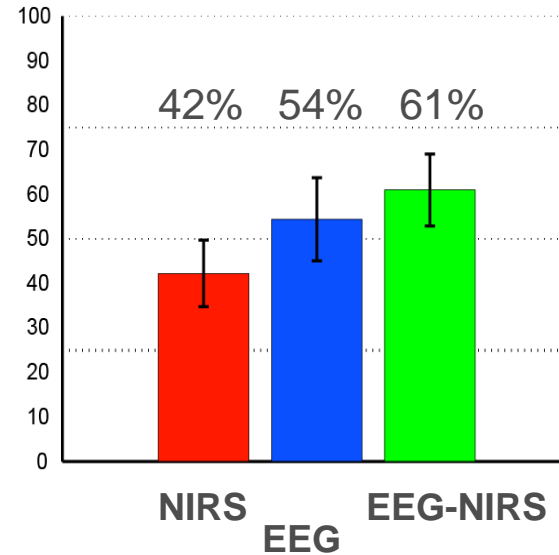
1. 0.5Hz ローパスフィルタ
2. moving widow average (幅2秒、シフト1秒)
3. channel selection
4. Sparse logistic regression  
(one-versus-others binary scheme)

# EEG-NIRS BMI : ベースライン解析手法の結果

8日分の正答率



8日分の平均正答率



- 4択正答率 61 %程度
- NIRS効果の確認: ベースラインのEEG解析データに比べて平均 +7 %の向上

unpublished data

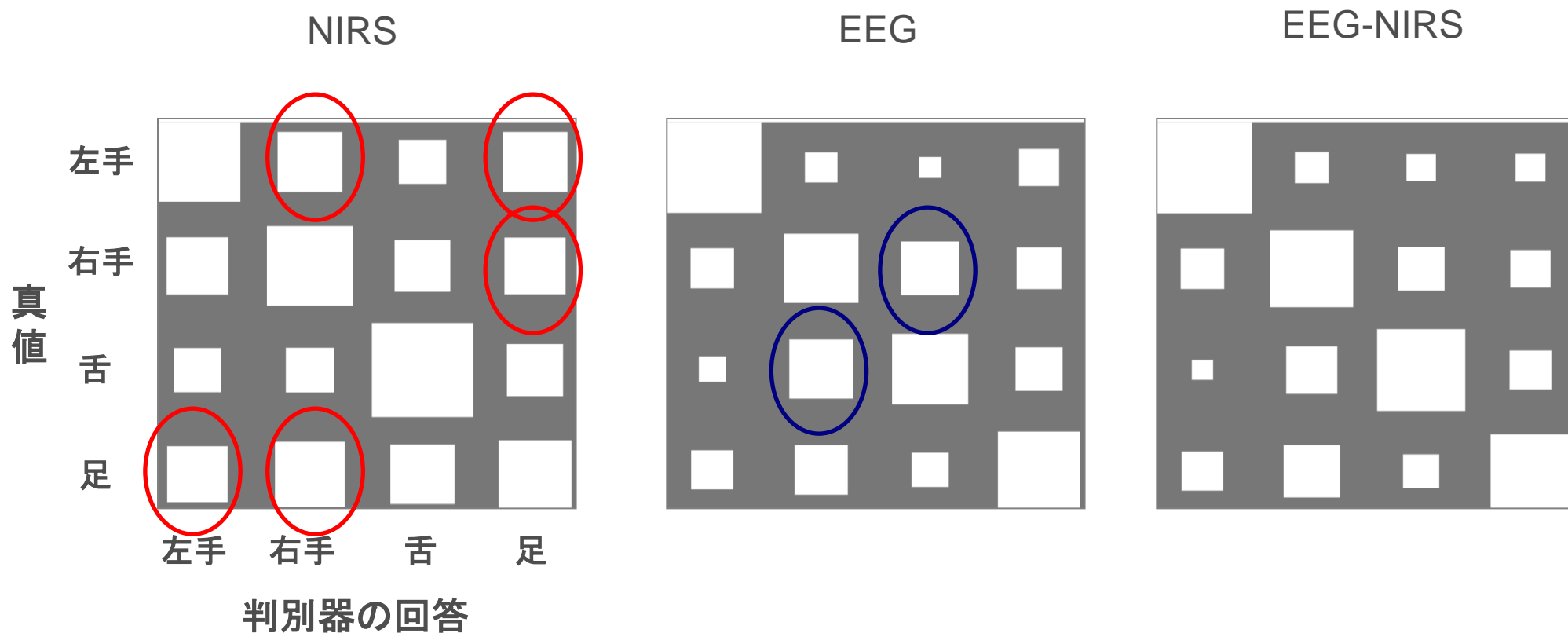
9月のデータ

EEG : 1-30Hzの周波数パワー, rlrp

NIRS : within day 4値, slrp, w=1

# EEG-NIRS BMI : ベースライン解析手法の結果

## EEGとNIRSの誤答・正答パターン



unpublished data

3 feature windows : [5 9;7 11;9 13]  
within-day classification

# Main Result : さまざまな技術による正答率の向上

赤字: TS:9月 8days

青字: TS:11,12月 8days

緑字: TT:12,1月 4days

[他日データ]

(EEG、スパース、当日、他日)

86.0 ± 3.9	+20.7
82.0 ± 6.0	+10.9
72.3 ± 3.4	+7.8

[NIRS]

(EEG、スパース、当日、NIRS)

69.1 ± 5.4	+3.8
73.0 ± 7.1	+1.9
64.8 ± 11.8	+0.3

[VB]

(EEG、スパース、当日、VB)

74.7 ± 4.8	+9.4
77.7 ± 8.8	+6.6
69.6 ± 6.2	+5.1

単位: %

[Baseline]

(EEG、正則化、当日)

54.4 ± 8.7
55.4 ± 7.8
55.0 ± 6.7

[スパース化]

(EEG、スパース、当日)

65.3 ± 7.5	+9.9
71.1 ± 7.1	+15.7
64.5 ± 9.9	+9.5

正答率

Gain

[全部]

(EEG、当日、スパース、  
NIRS、他日、VB)

92.2 ± 3.6
91.3 ± 3.8
80.7 ± 3.3

unpublished data

世界初のEEG-NIRS同時計測によるBMI  
高い脳情報解読精度

でも、NIRSの効果は小さく、リアルタイム性を犠牲。

統合の仕方をもう少し工夫出来ればよかった。

自然な脳活動に基づくBMI支援により、充実した日常生活が可能に



EEG電極

NIRS装置

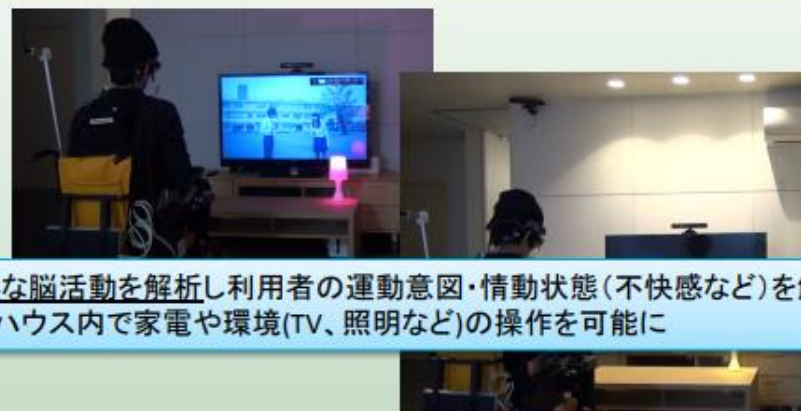
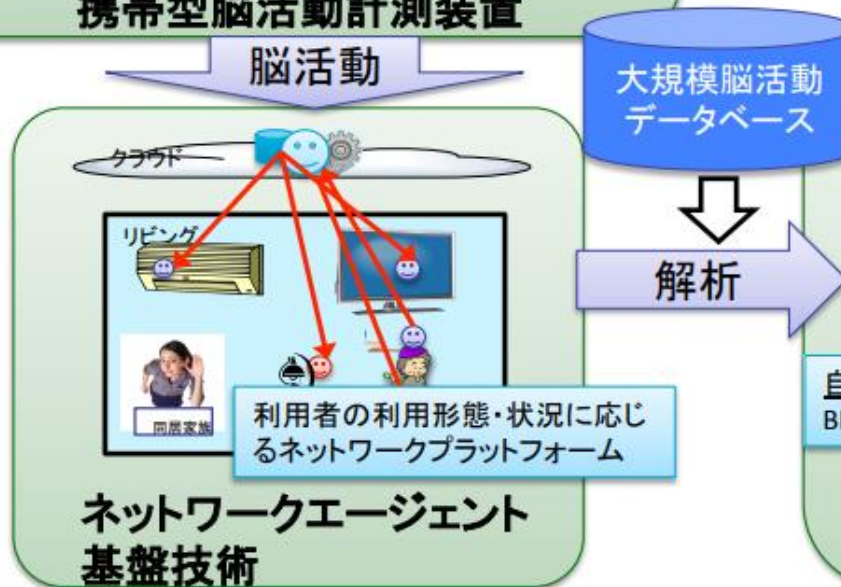
日常的・継続的に使用可能な脳活動計測装置

**携帯型脳活動計測装置**



従来のBMIでは強く念じる必要があった

## 実環境実験設備 (BMIハウス)



自然な脳活動を解析し利用者の運動意図・情動状態(不快感など)を解釈、BMIハウス内で家電や環境(TV、照明など)の操作を可能に

## 脳情報解析技術・移動支援機器安全制御技術



# BMIの実際的な問題

- 計測準備の手間  
→ 乾式の簡易脳波計，計測範囲を絞る
- キャリブレーション実験の時間  
→ 転移学習など機械学習法の工夫による解決策 (Krauledat et al. 2007,2008, Fazli et al. 2010, Alamgir et al. 2010, Lotte 2010, ...)
- アーチファクトの問題(体動、眼球運動、筋電)  
→ 独立成分分析など信号処理の方法の適用
- 運動想像の観測不能性  
→ システムのデバッグが困難
- コンピュータ間の通信・同期

# 講義内容

1. BMIとは
2. 運動出力型BMI
3. 刺激誘発型BMI
4. ATRにおけるBMI研究
- 5. その他の話題**

# Brain-to-Brain Communication 2014年

OPEN ACCESS Freely available online

(Barcelona大学)



## Conscious Brain-to-Brain Communication in Humans Using Non-Invasive Technologies

Carles Grau<sup>1,2</sup>, Romuald Ginhoux<sup>3</sup>, Alejandro Riera<sup>1,4</sup>, Thanh Lam Nguyen<sup>3</sup>, Hubert Chauvat<sup>3</sup>, Michel Berg<sup>3</sup>, Julià L. Amengual<sup>5</sup>, Alvaro Pascual-Leone<sup>6</sup>, Giulio Ruffini<sup>1,4\*</sup>

OPEN ACCESS Freely available online

(Washington大学)



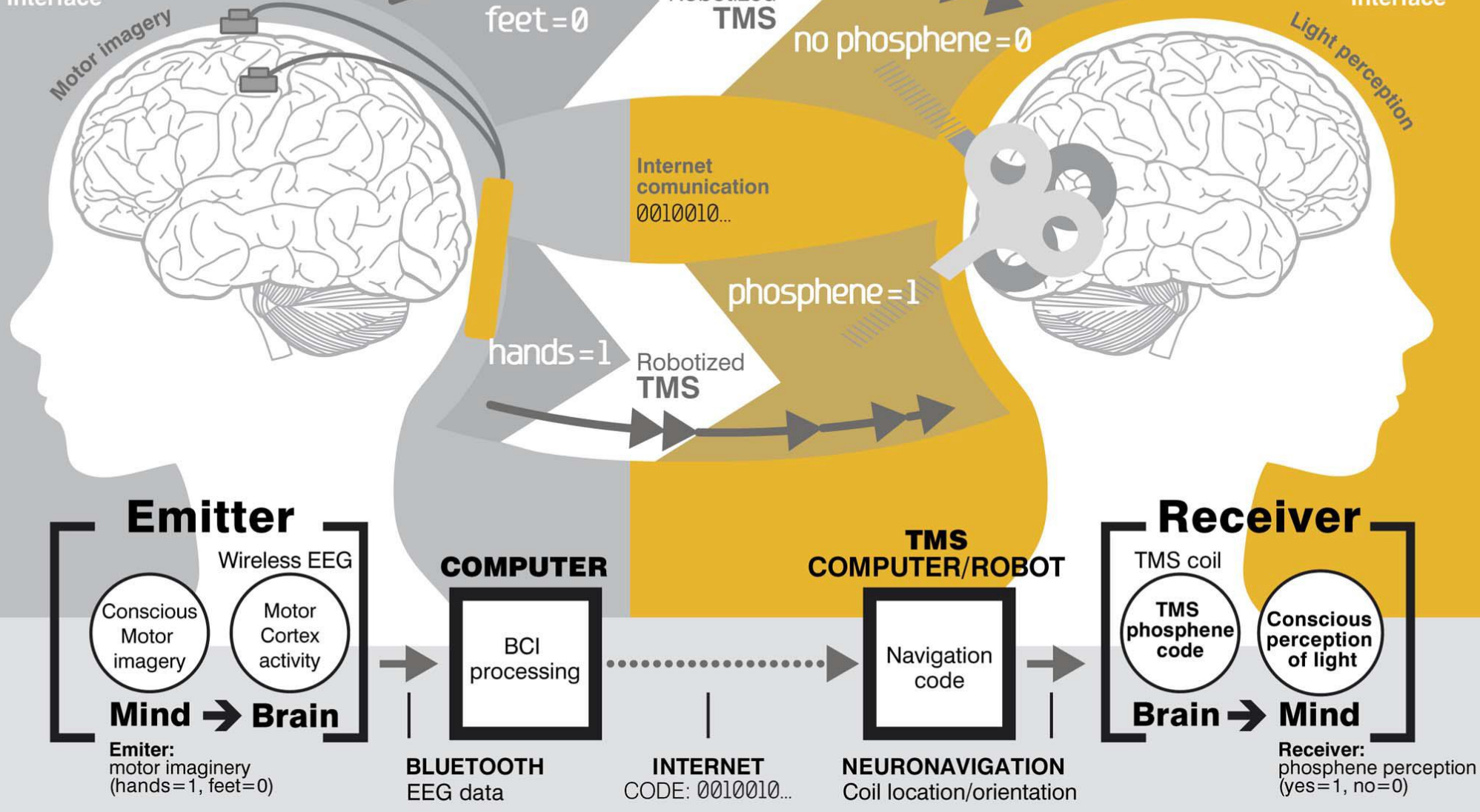
## A Direct Brain-to-Brain Interface in Humans

Rajesh P. N. Rao<sup>1\*</sup>, Andrea Stocco<sup>2\*</sup>, Matthew Bryan<sup>1</sup>, Devapratim Sarma<sup>3</sup>, Tiffany M. Youngquist<sup>3</sup>, Joseph Wu<sup>1</sup>, Chantel S. Prat<sup>2</sup>

**1** Department of Computer Science & Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, United States of America, **2** Department of Psychology and Institute for Learning & Brain Sciences, University of Washington, Seattle, Washington, United States of America, **3** Department of Bioengineering, University of Washington, Seattle, Washington, United States of America

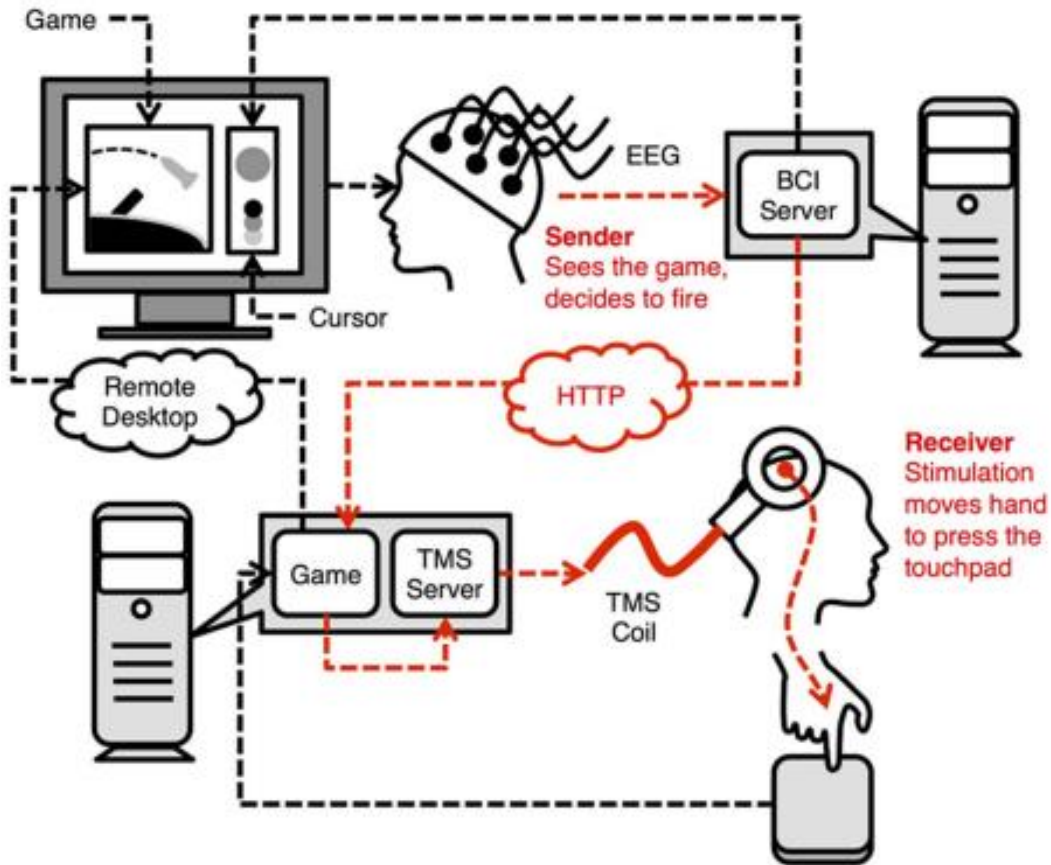
**BCI**  
Brain  
Computer  
Interface

**CBI**  
Computer  
Brain  
Interface



140 bit 転送し、エラーは 数% 程度

Grau et al. 2014



Sender : 運動想像  
 Receiver : TMSにより右手動作  
 戦艦から撃たれたミサイルを打ち落とす



A

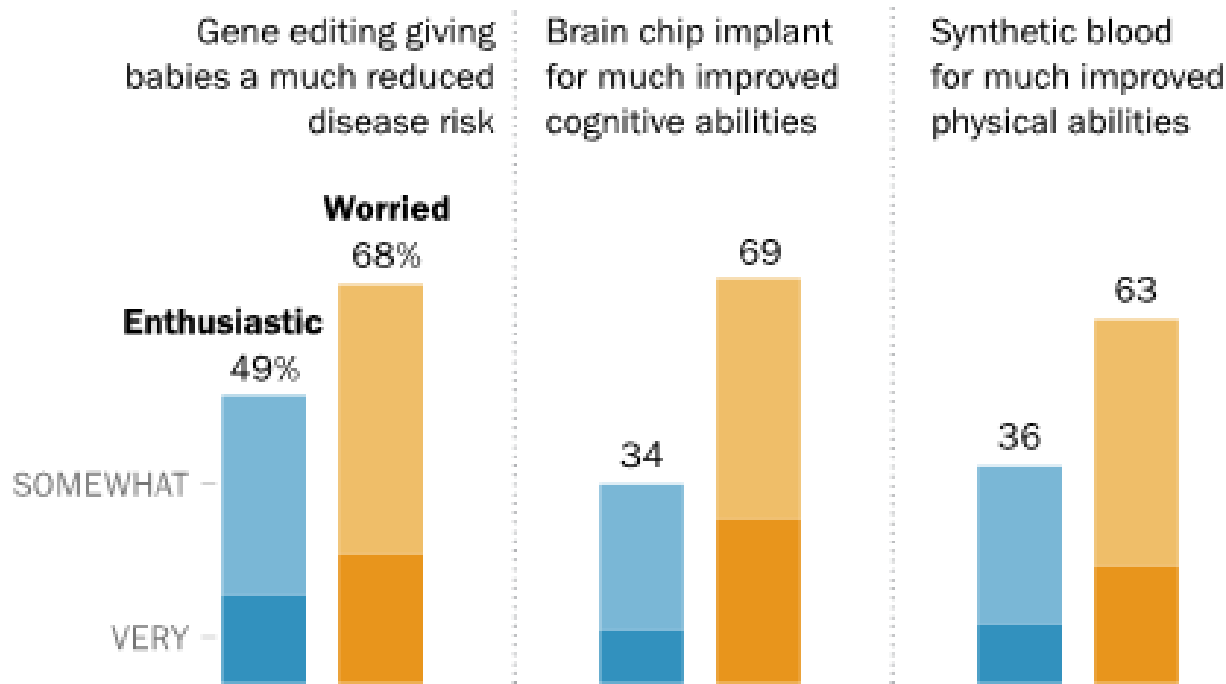
	Condition	Pair 1	Pair 2	Pair 3
% Rockets Hit	Experimental	83.33%	25.00%	37.50%
	Control	0.00%	0.00%	0.00%
% Planes Hit	Experimental	37.50	18.75%	0.00%
	Control	0.00%	0.00%	0.00%

doi:10.1371/journal.pone.0111332.t002

# BMIの倫理的問題

## Public expresses more worry than enthusiasm about each of these potential human enhancements

% of U.S. adults who say they are \_\_\_\_\_ about each of these enhancements



安全性 = 脳の可塑性

プライバシー = 脳情報を解読すること

Note: Respondents who gave other responses or who did not give an answer are not shown.

Source: Survey of U.S. adults conducted March 2-28, 2016.

"U.S. Public Wary of Biomedical Technologies to 'Enhance' Human Abilities"

# BMIの革新 : アメリカのTechnology企業の参入



- **Facebook**

脳から直接言語情報を読み出すことにより、1分で100単語入力を可能に！

- **Neuralink Elon Mask**

4年以内にBMIを市場に



- 入力型BMIと出力型BMI
- 運動出力型BMI:運動想像パラダイム
- 刺激誘発型:P300パラダイム、定常視覚刺激
- BMIの実際的な問題
- BMIの倫理問題



BMI = “考えるだけで〇〇をする装置” ？

現状： ごく限定的な利用シーン、ユーザに対して実用的なレベルに近づいている。

利用シーン・利用可能なユーザーを拡大するには、さらなるブレイクスルーが必要。 特に、脳計測の革新が求められる。