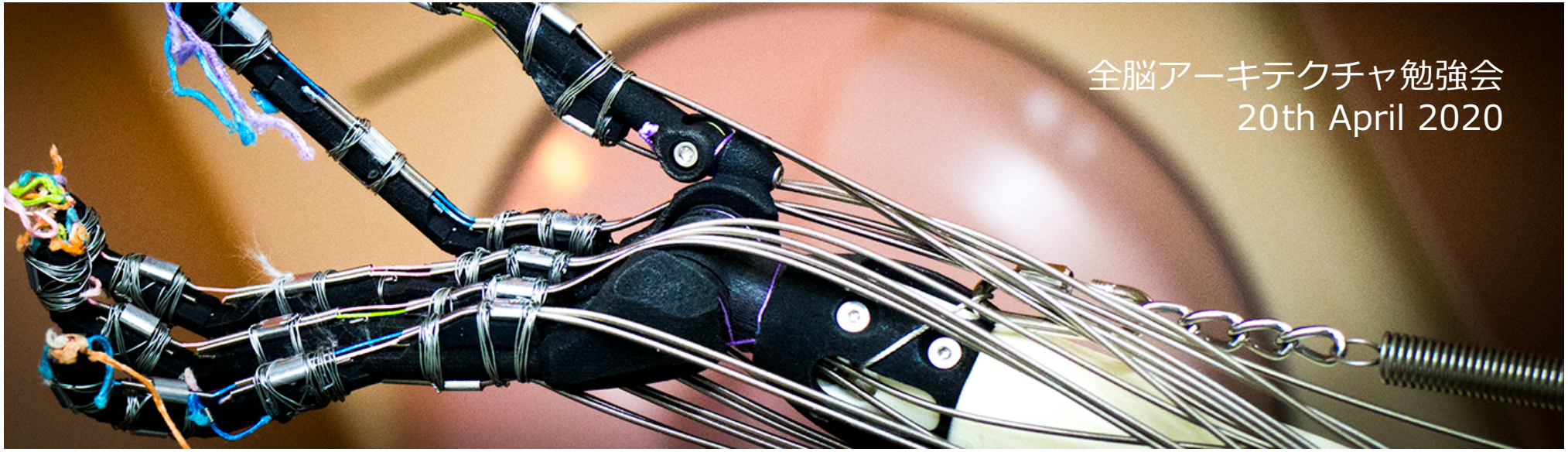


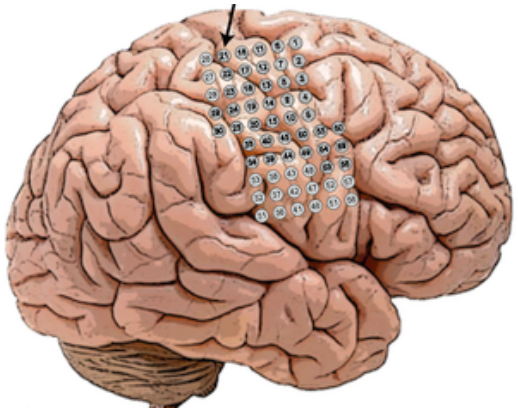
Brain-Computer Interfaceによる脳とAIのインタラクション

柳澤琢史
大阪大学　高等共創研究院/ 脳神経外科

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

自己紹介

早稲田大学大学院　物理学修士
　相澤洋二先生、非線形非平衡統計力学
大阪大学　医学部　医師・研究者コース
　津本忠治先生、神経生理学教室
大阪大学大学院　脳神経外科　博士
　皮質脳波Brain-Computer Interfaceの開発



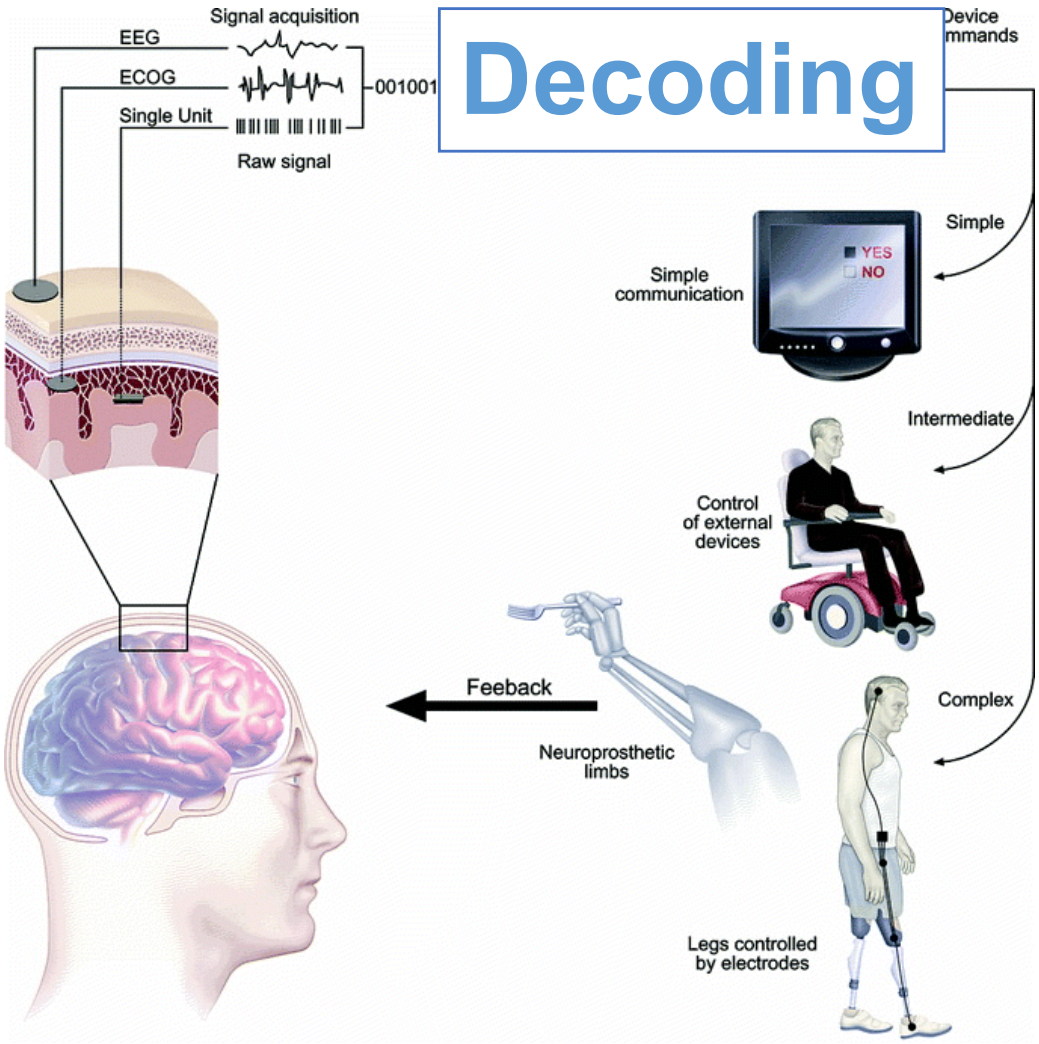
脳情報の解読・制御技術の医療応用

本日の話題

1.侵襲的BCIの医療応用はどこまで現実的か

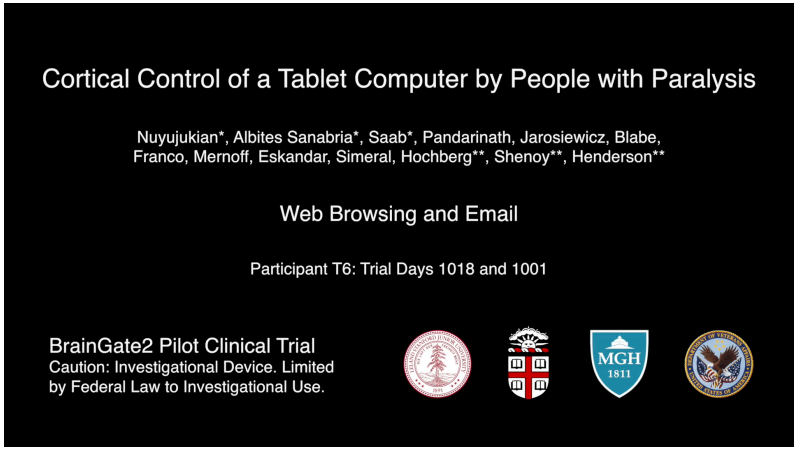
2.BCIを介した脳とAIとのインタラクション

機能補填としてのBCIの医療応用



Modified from Leuthardt, Neurosurg, 2006

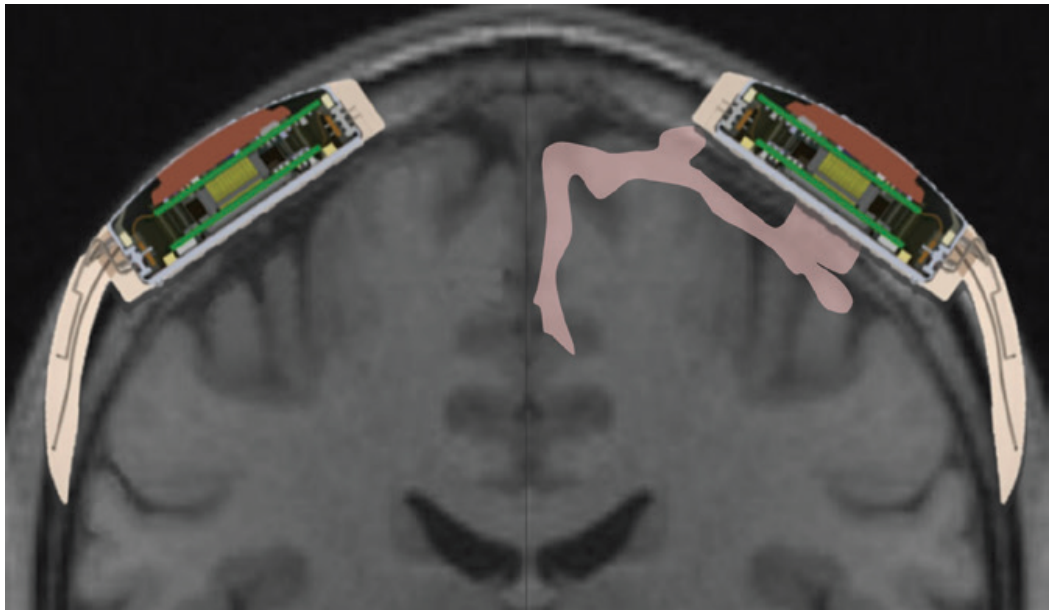
意思伝達

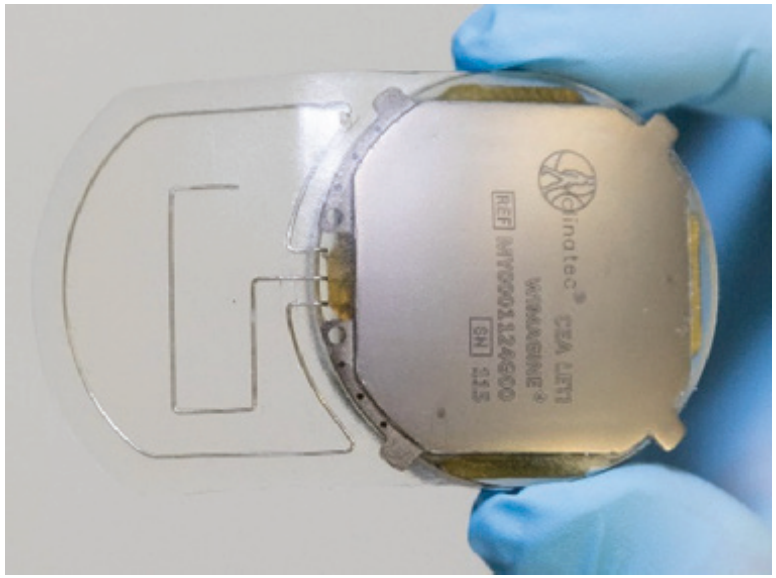


P. Nuyujukian et al, PLoS One, 2018

運動機能

Hochberg et al., Nature, 2012





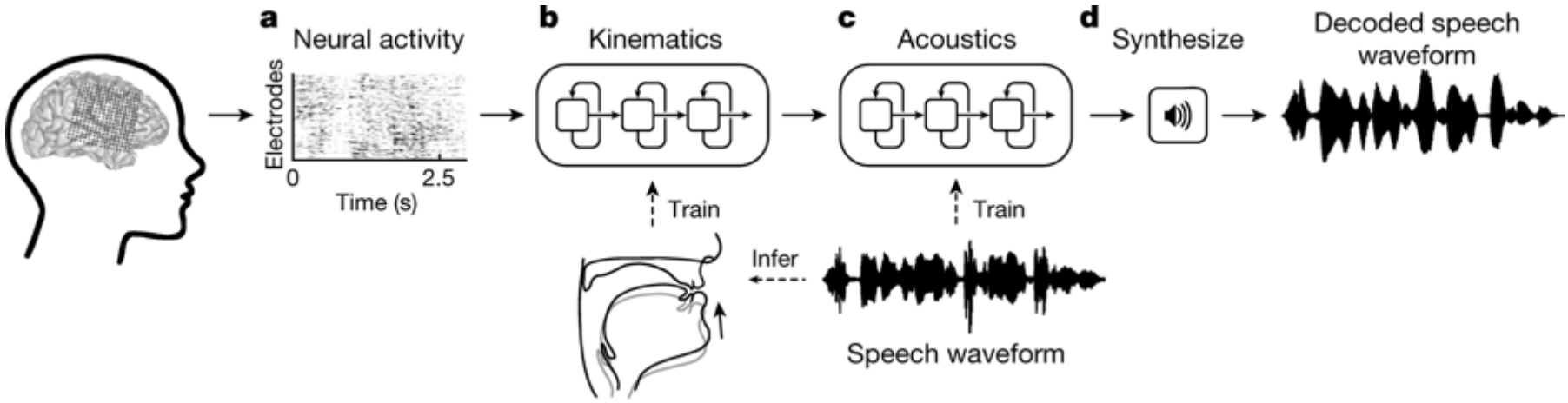
A. Bernabid et al., Lancet neurol., 2019; WIMAGINE

BCIによる意思伝達

ALSに対する運動BMIで現在の最速は31.6ccpm

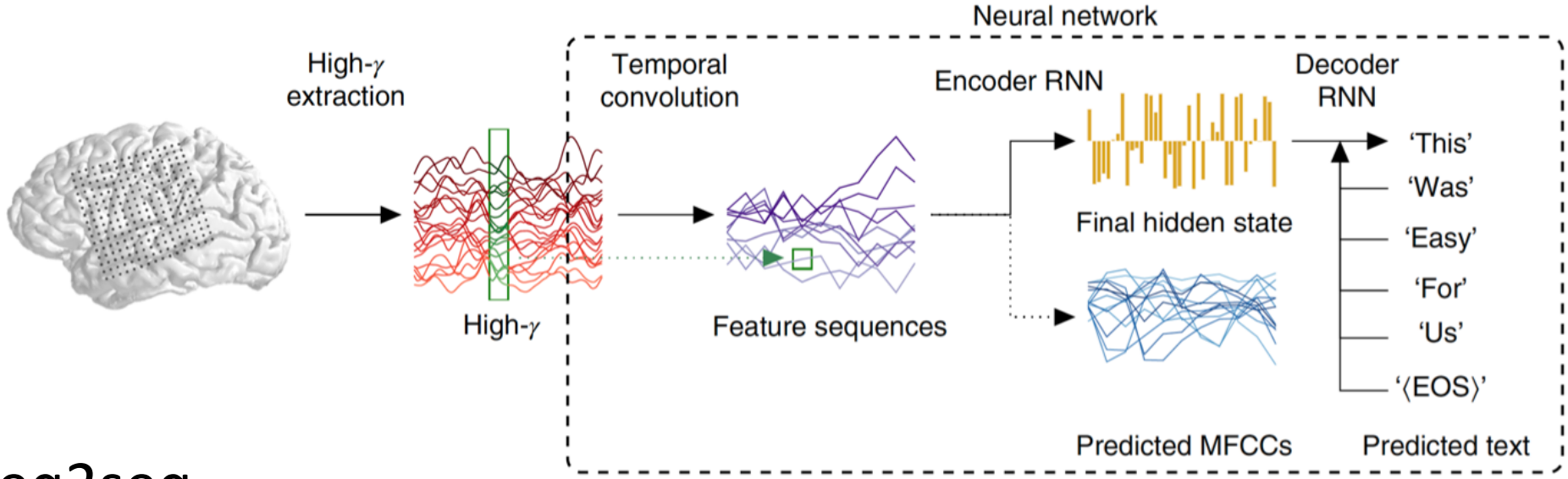
C. Pandarinath et al, eLife, 2017

ECoGから音声を生成

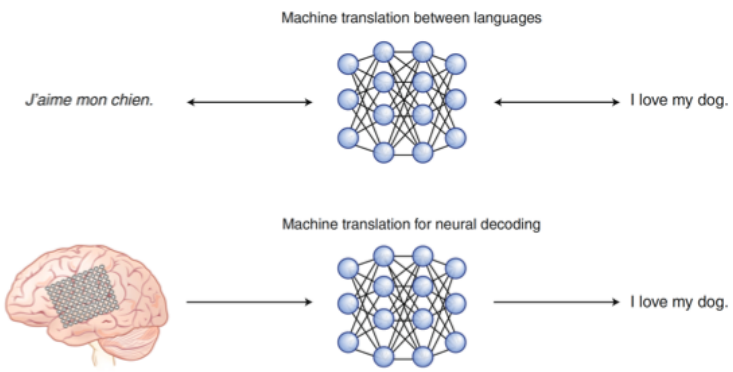


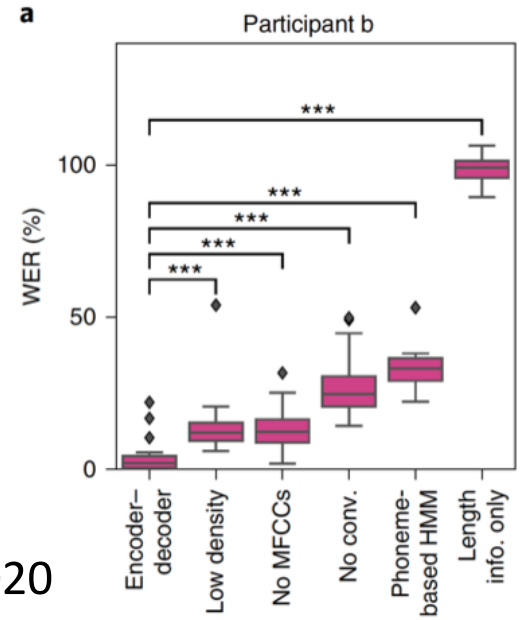
Gopala et al., Nature, 2019

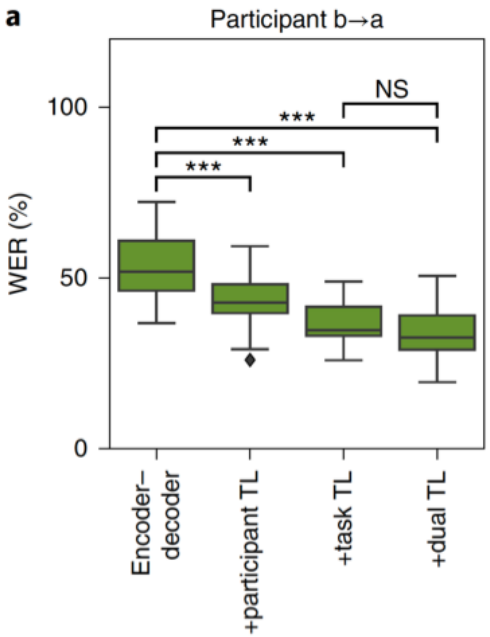
ECoGからTextを生成



seq2seq



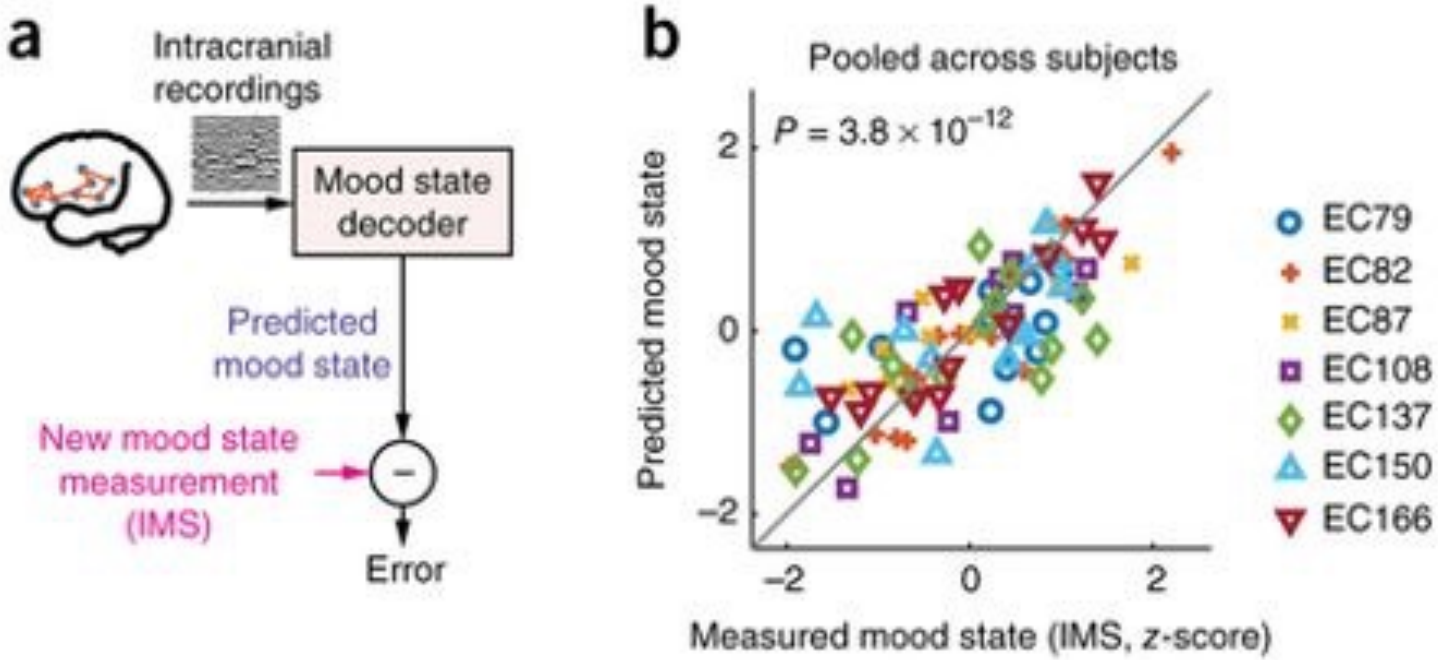


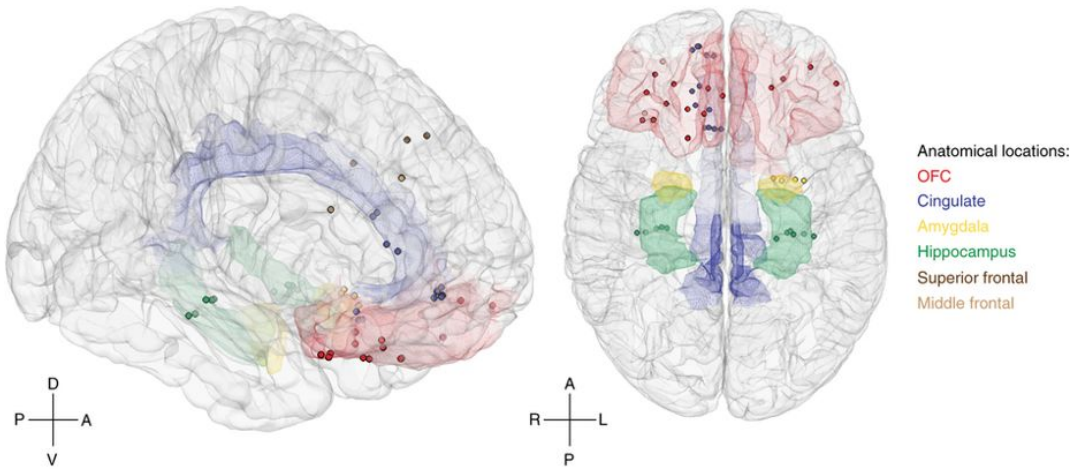


Gregory B. Cogan, Nat. Neuro, 2020

Joseph G. Makin et al., Nat. Neuro, 2020

ECoGから気分を推定

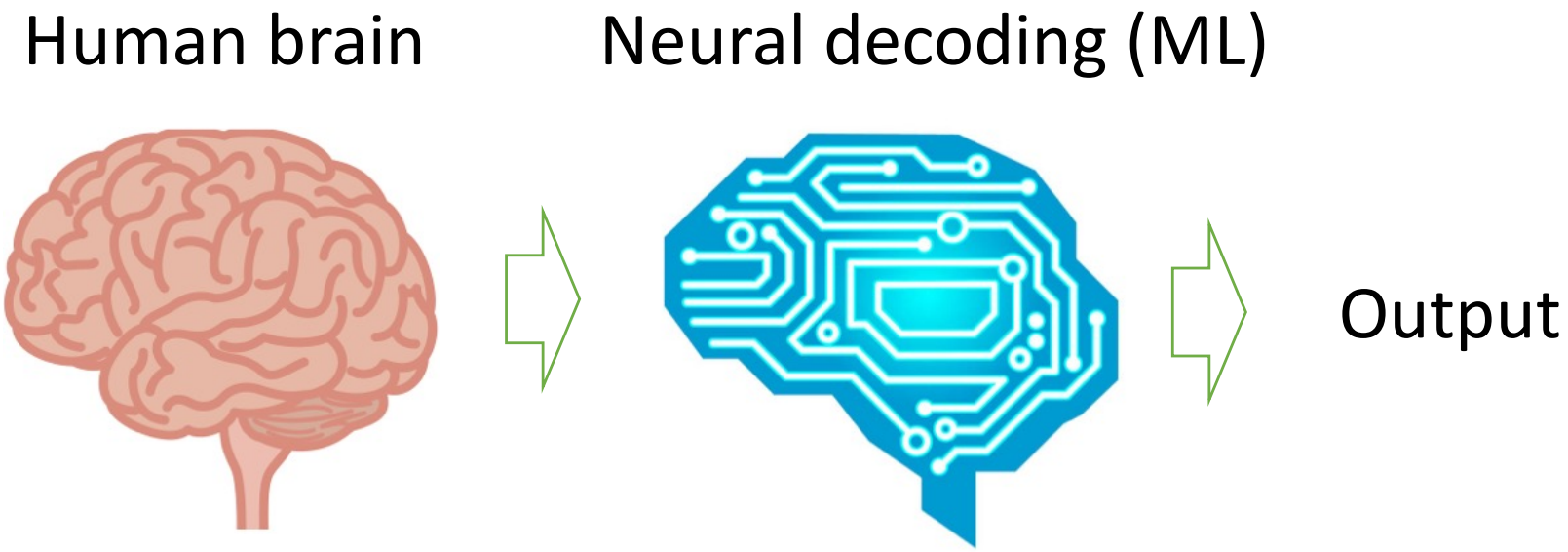




Sani et al., Nat. Biotech., 2018

✓脳情報解読の精度が上がり、高自由度の運動情報や言語、感情などを高精度に推定できるようになった。

✓脳から情報を出力する機能は、BCIを使うことで身体の状況によらず維持できるかもしれない

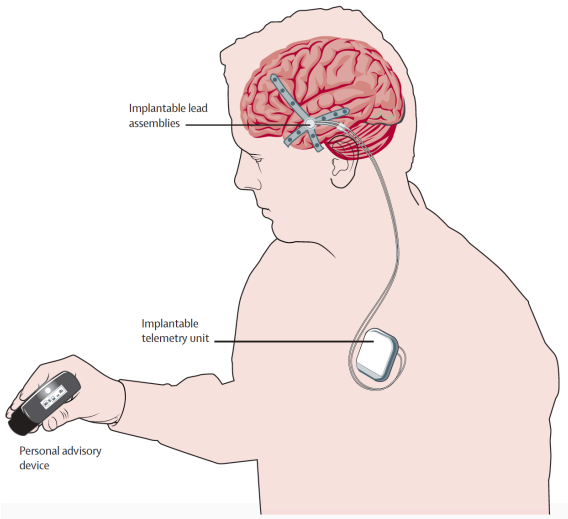


体内埋め込み型デバイス

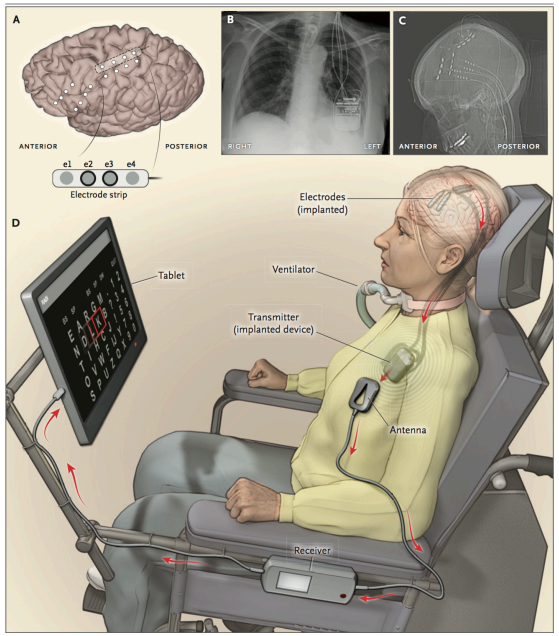
Table 1 | Select companies developing BCIs and related technologies

Company	Device	Type	Status
CorTec	AirRay	ECoG implant	FDA approved
Blackrock Microsystems	Utah Array	Intracortical implant	FDA approved
NeuroLutions	IpsiHand	EEG	Clinical
Synchron	Stentrode	Intravascular implant	Early clinical feasibility study
NeuroNexus Technologies	Matrix Array	Intracortical implant	Preclinical
Iota Biosciences	Neural dust	Wireless microimplants	Preclinical
Ad-Tech Medical	Epilepsy/LTM	ECoG implant	FDA approved

E. Smalley, Nat. Biotech., 2019



M. Cook et al.,
Lancet Neurol 2013

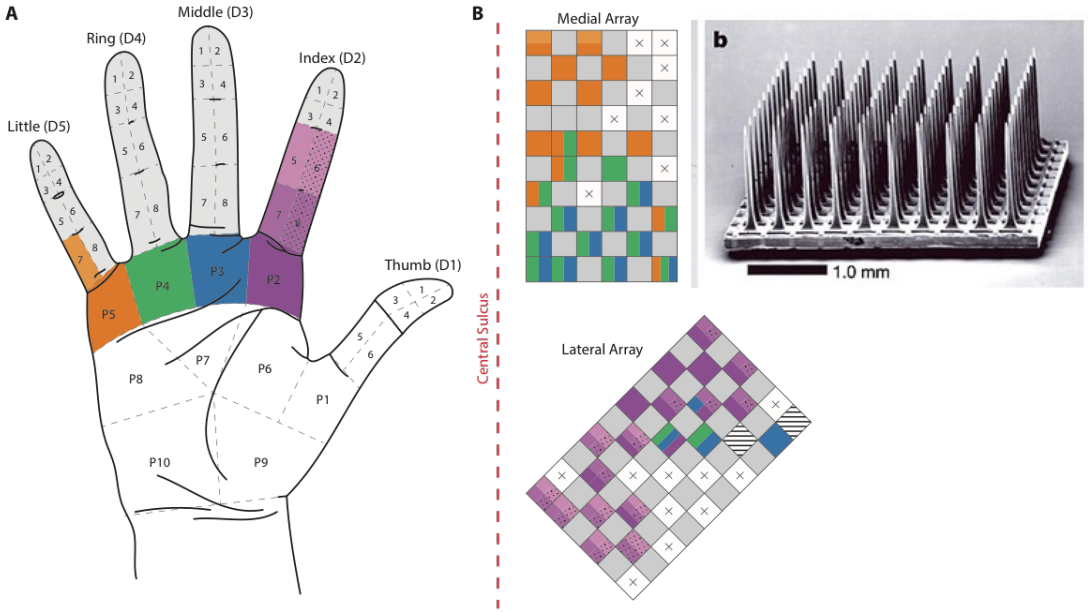


Mariska et al., NEJM, 2016

A. Bernabid et al.,
Lancet neurol., 2019

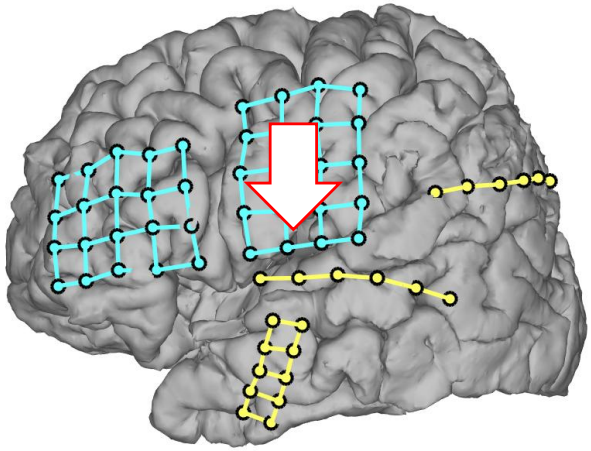
脳へ情報を入力する技術

刺入電極による電気刺激



Flesher et al., Sci. Transl. Med., 2016

硬膜下電極による電気刺激

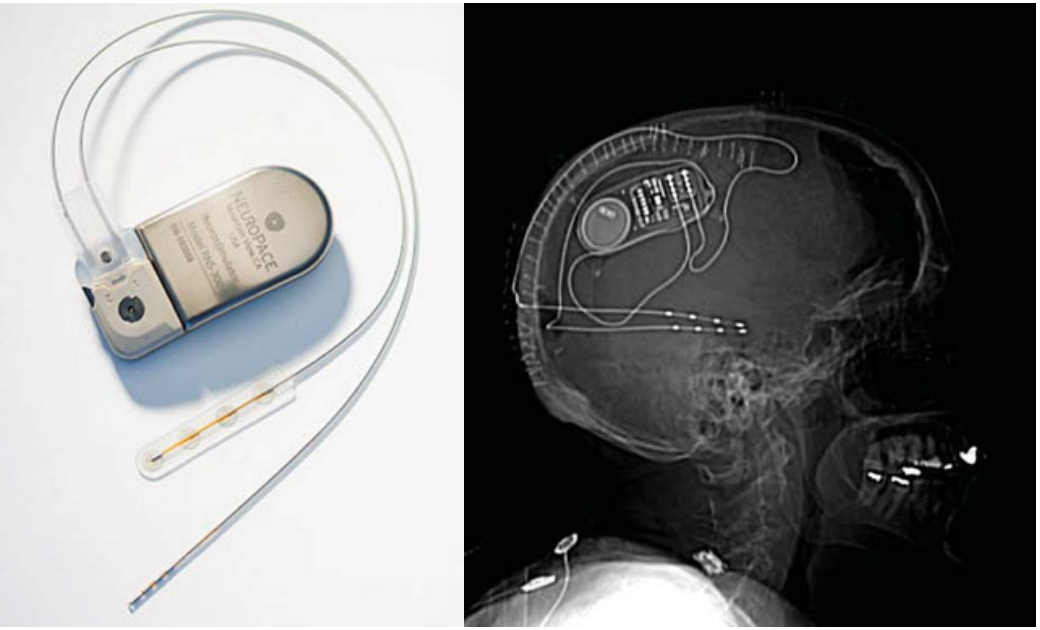


“It’s as if I’m eating pineapple, but there’s no taste”

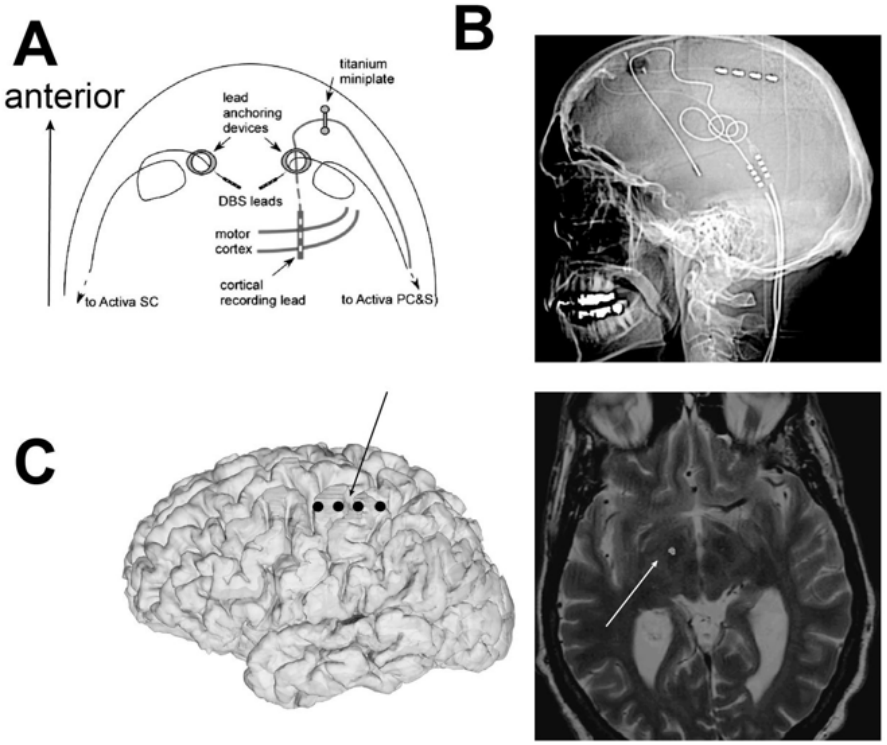
Kirin et al., Front. Neurosci., 2019

Closed-loop制御の刺激装置

てんかん発作に対するRNS



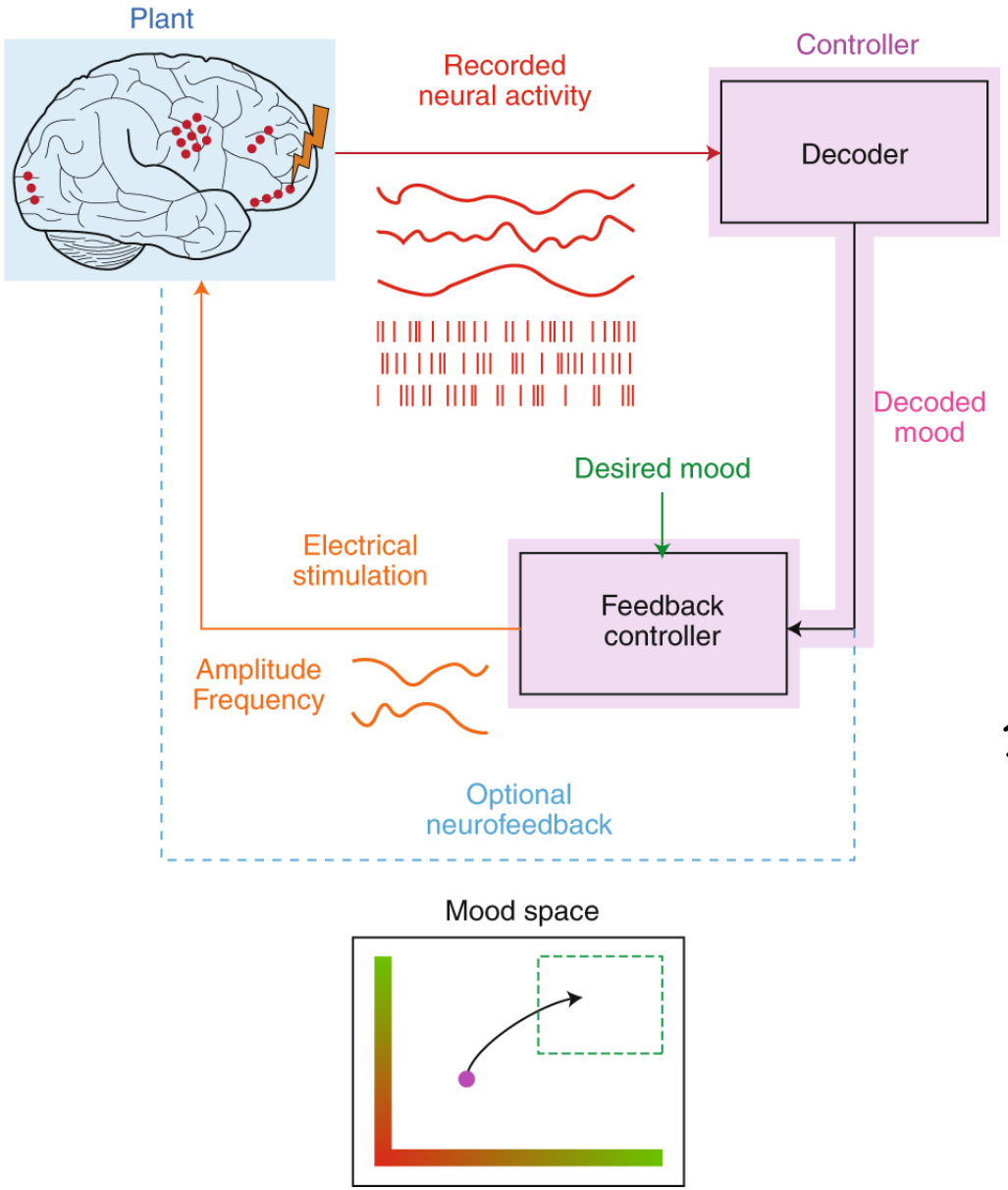
パーキンソン病に対する
脳深部刺激装置



F. T. Sun and M. J. Morrel, Expert review of medical devices, 2014

N.C. Swann al., J Neurosurg. 2018

Decodingと組み合わせた医療応用?

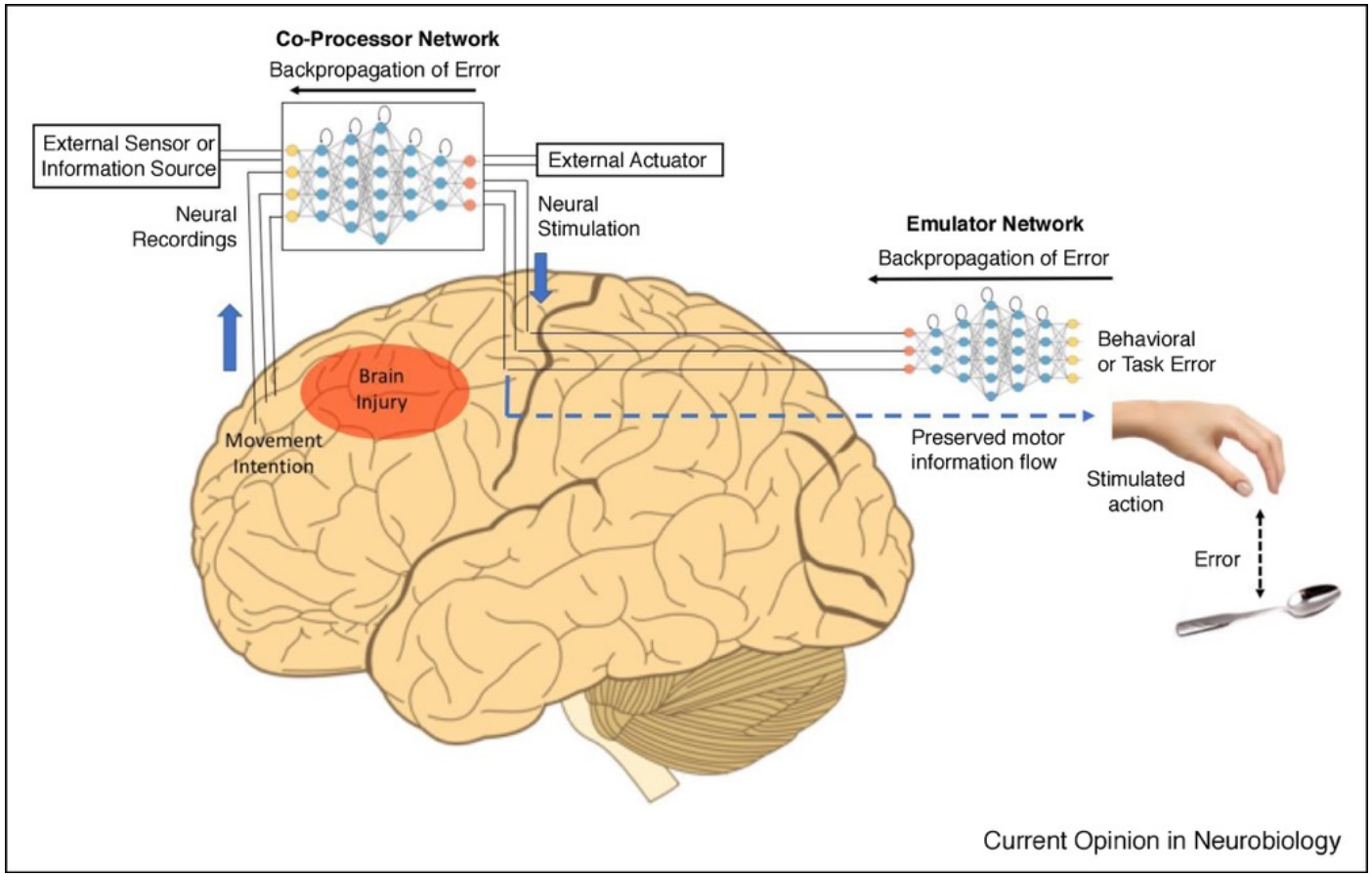


分の推定に応じた脳電気刺激にって気分を制御？

Shanechi et al., Nat. Neurosci. 2019

Brain-Chip

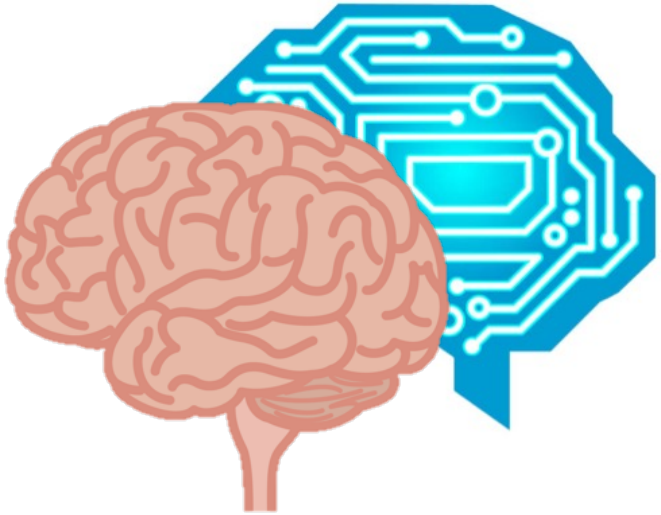
Brain ⇨ AI ⇨ Brain



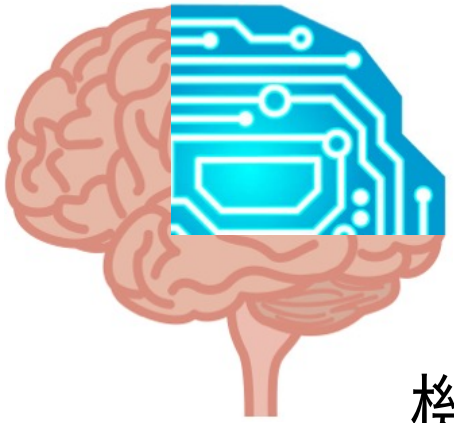
Rajesh Rao., Curr. Opi. Neurobiol., 2019

Human brain

機能の拡張



AGI



脳とAIのインタラクション
（BCI+closed loop）

機能の補填（BCI）

まとめ1

- 頭蓋内電極信号に深層学習などを適用することで、実用的な精度で脳情報を得ることができる
- 100極程度の計測と数極の電気刺激は既に体内埋め込み型デバイスとして実現した
- AIを用いた体内埋め込み型のClosed-loopシステムの臨床応用は実現しており、使えるチャネル数も増えることが期待される

課題

- BCIを介して脳とAIがインタラクションすると何が生じる？

- どのような医療応用、社会実装が可能か？
- AIによって脳との相性に違いがある？
- 現在の神経科学で全て説明できるか？
- 副作用はないの？

JST CREST Symbiotic Interaction

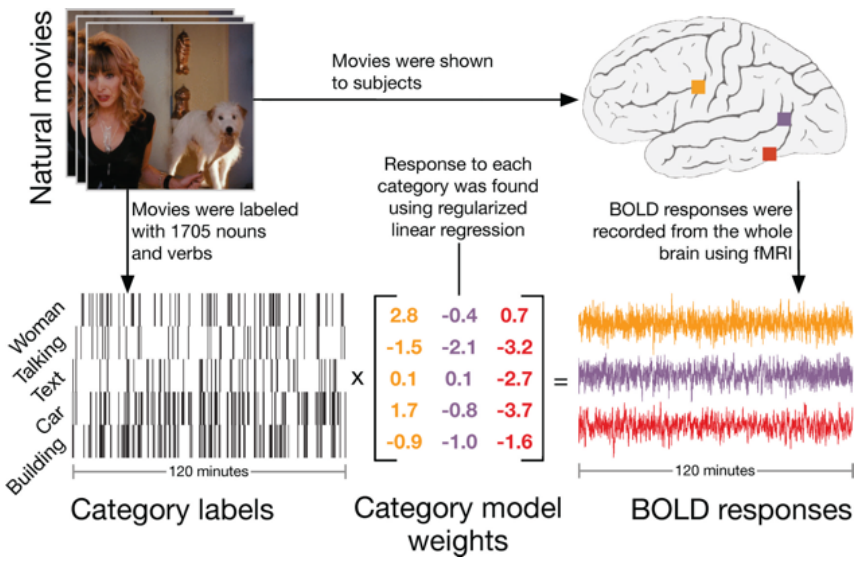
脳表現空間インタラクション技術の創出

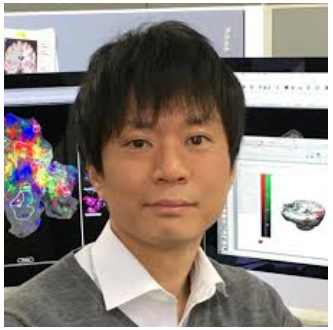
Neural decodingを用いて、外界の多様な情報と脳内の情報表現とを対応づけ、脳と計算機内の表現空間との新しいインタラクションを実現する技術を開発する

神経科学

脳神経外科

視覚情報の脳内表現



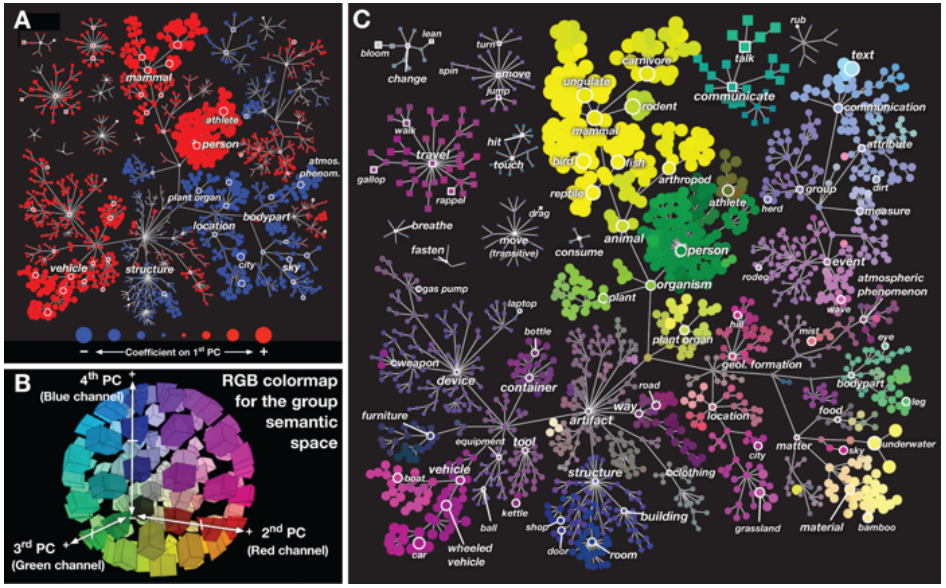


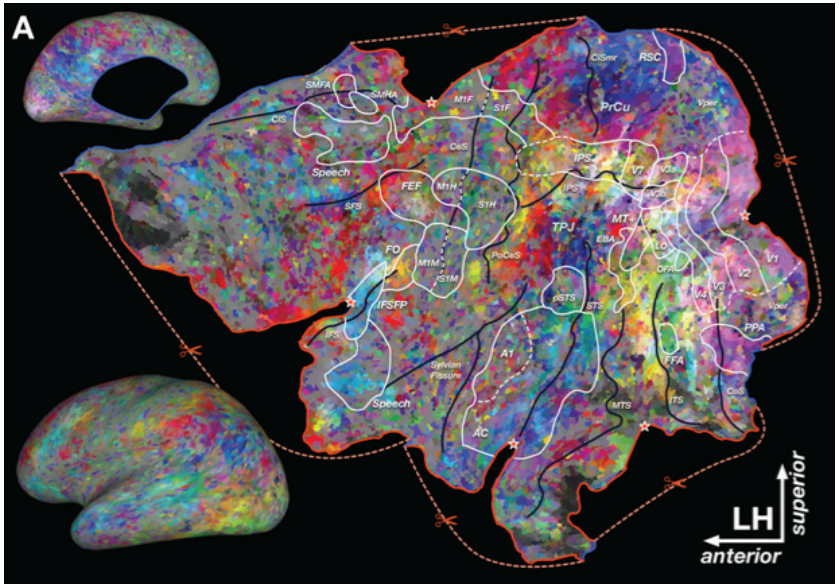
西本伸志先生
(CiNet)

視覚情報

Encoding

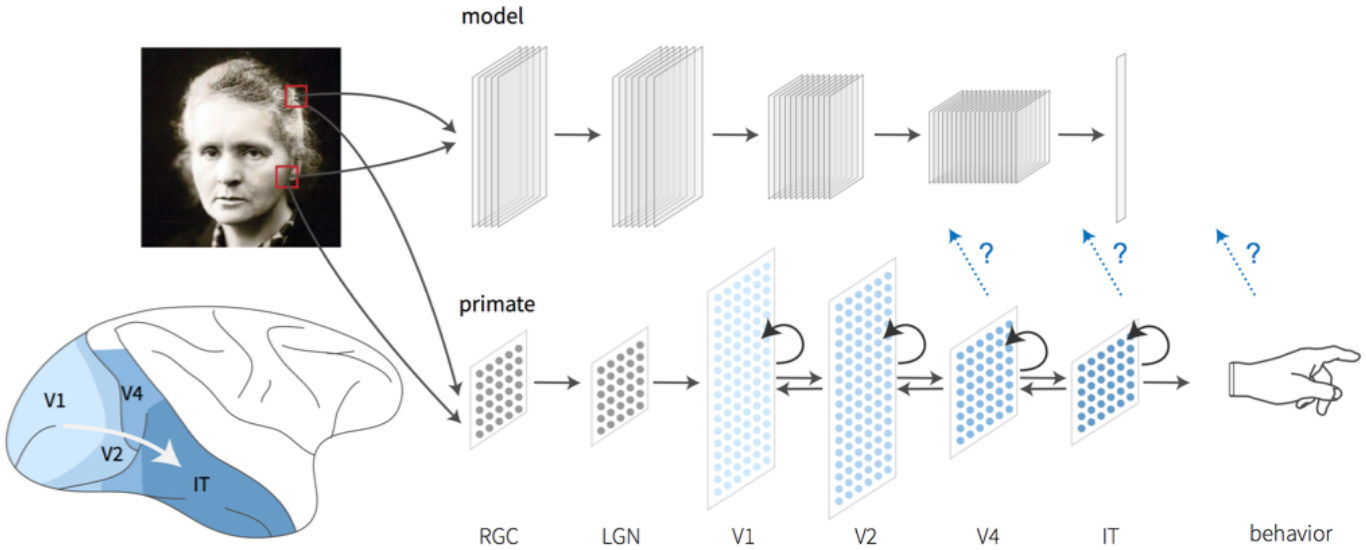
脳活動

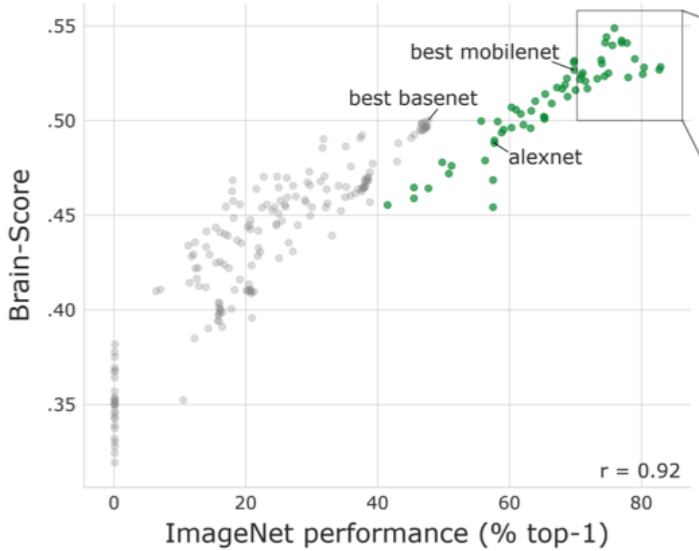


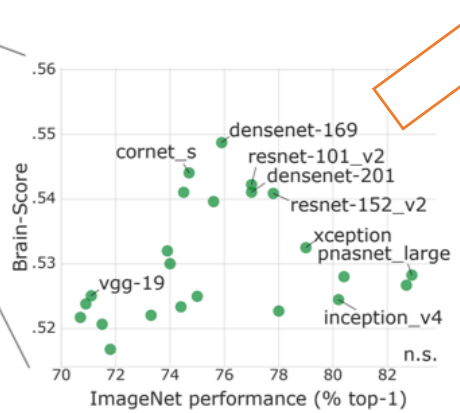


Huth, Nishimoto et al., Neuron, 2012

DNNは視覚処理の最も良いモデル





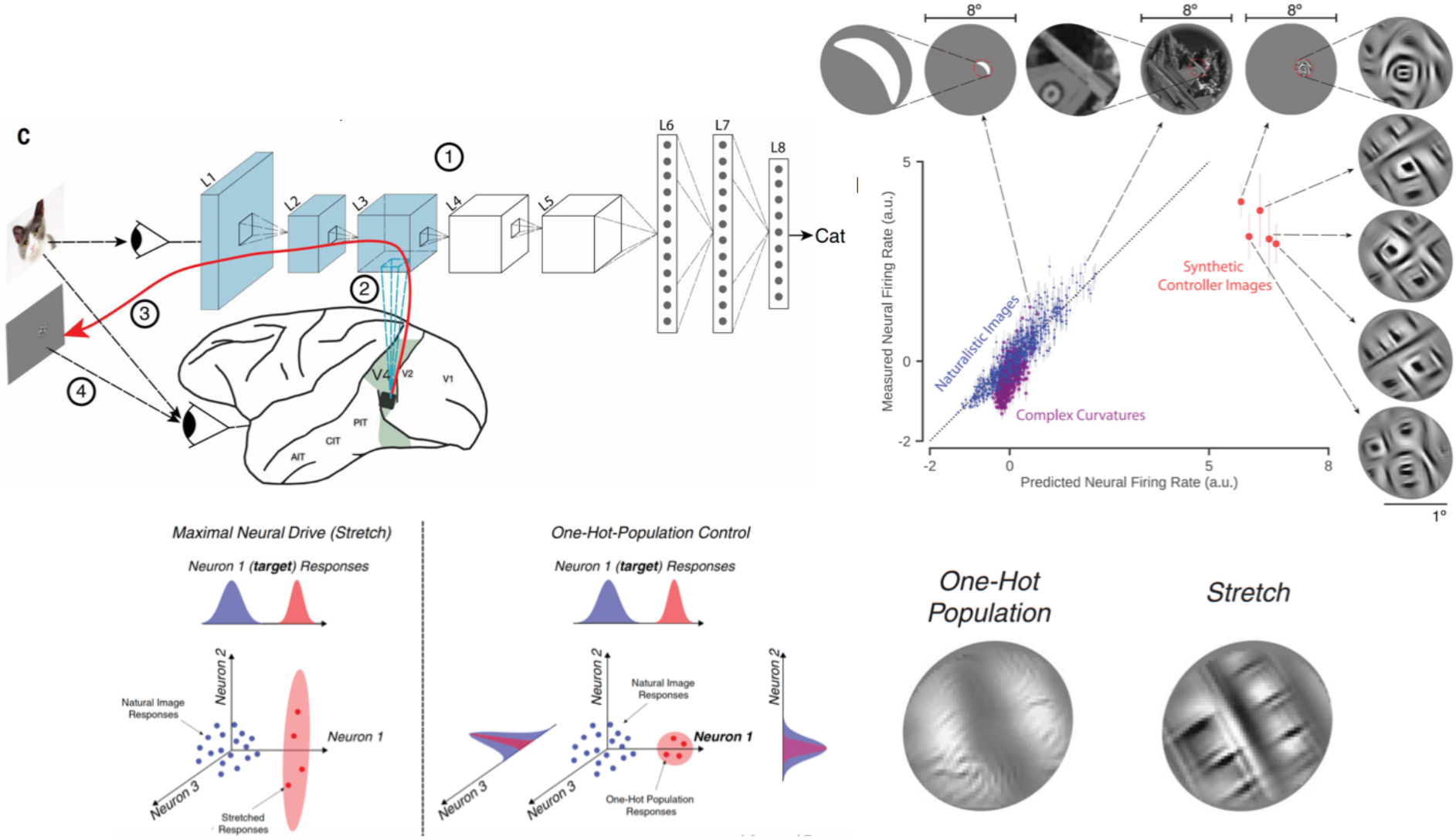


人の脳に似ていて精度が高い

人の脳に似ずに精度が高い

M. Schrimpf et al., bioRxiv, 2018

脳活動を予測して制御する



P. Bashivan et al., Science, 2019

視覚情報

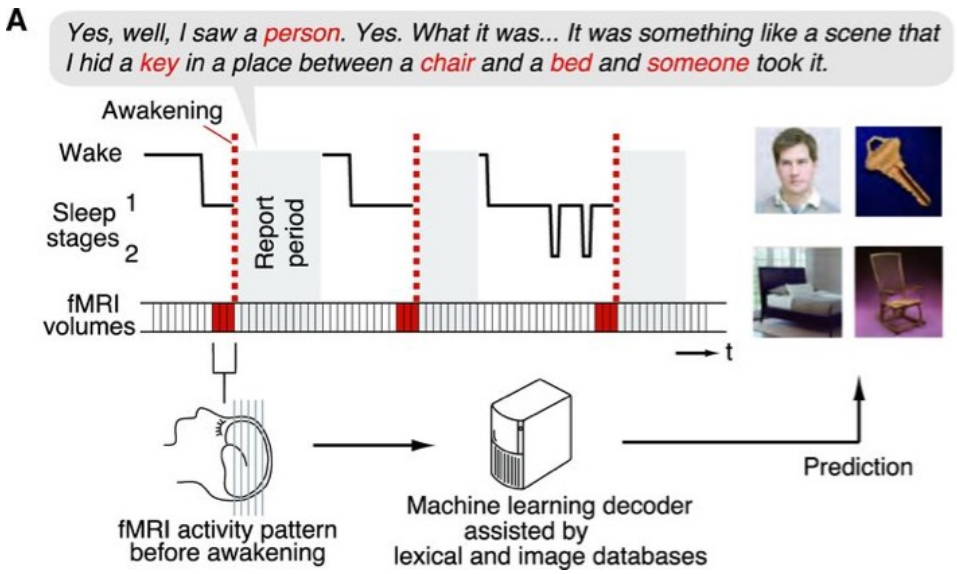
⇧

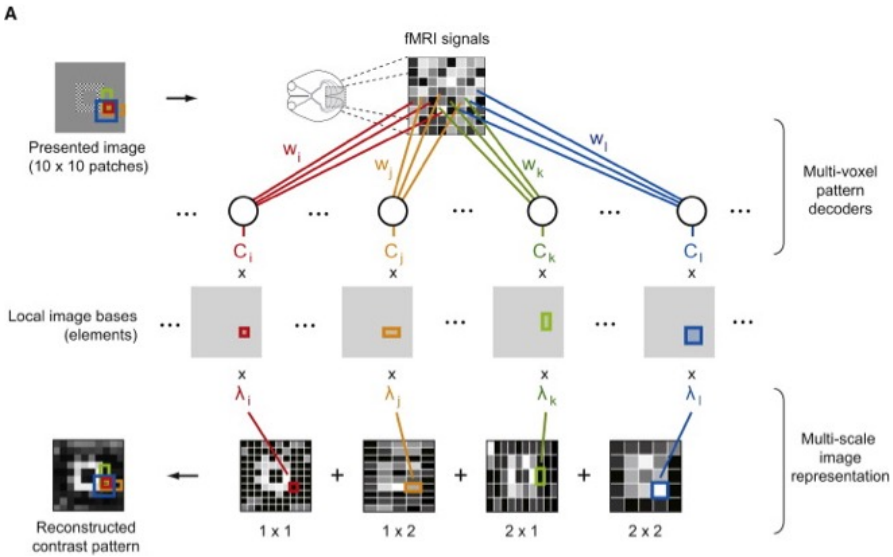
脳活動

Neural decoding

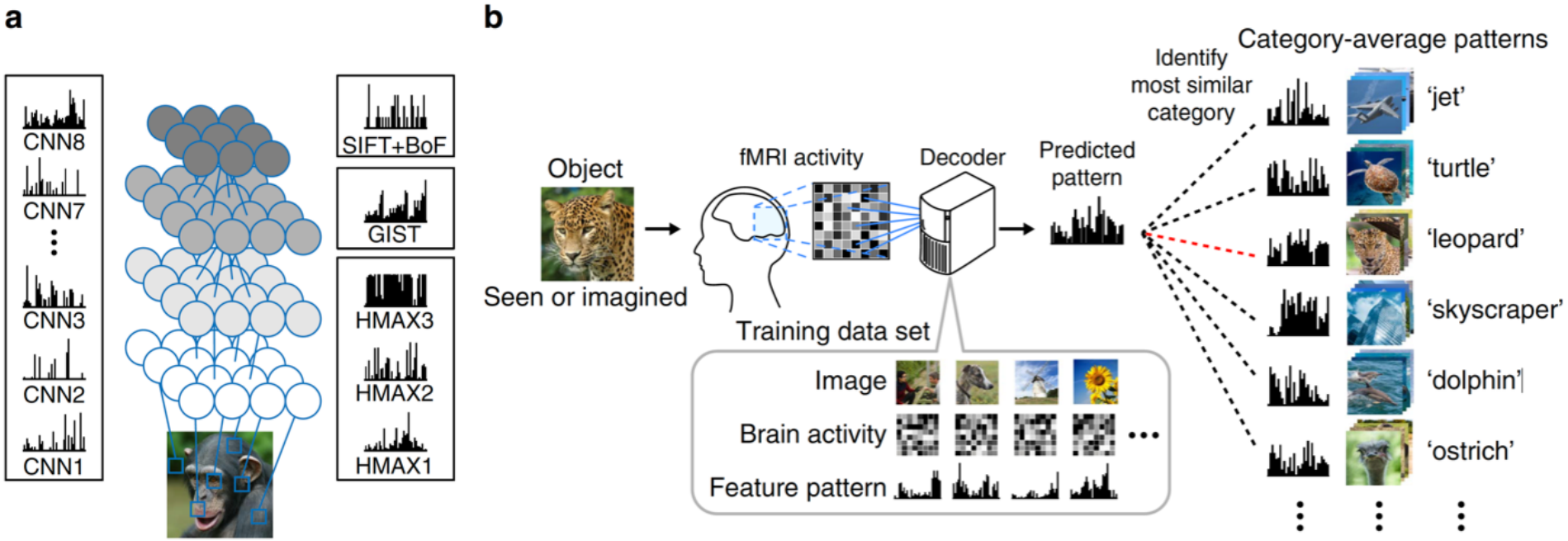
神谷之康先生
(ATR/京都大学)

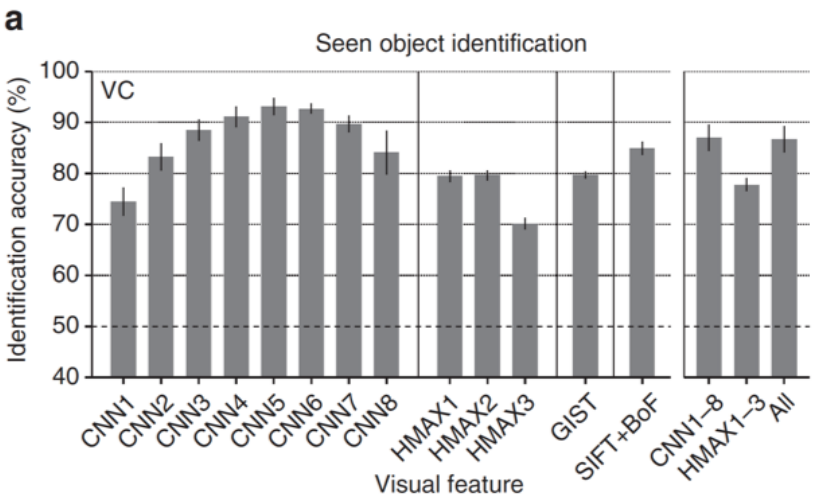
Neural decoding (Kamitani & Tong, *Nature Neuroscience* 2005)
Visual image reconstruction (Miyawaki et al., Neuron 2008)
Decoding dream contents (Horikawa et al., Science 2013)

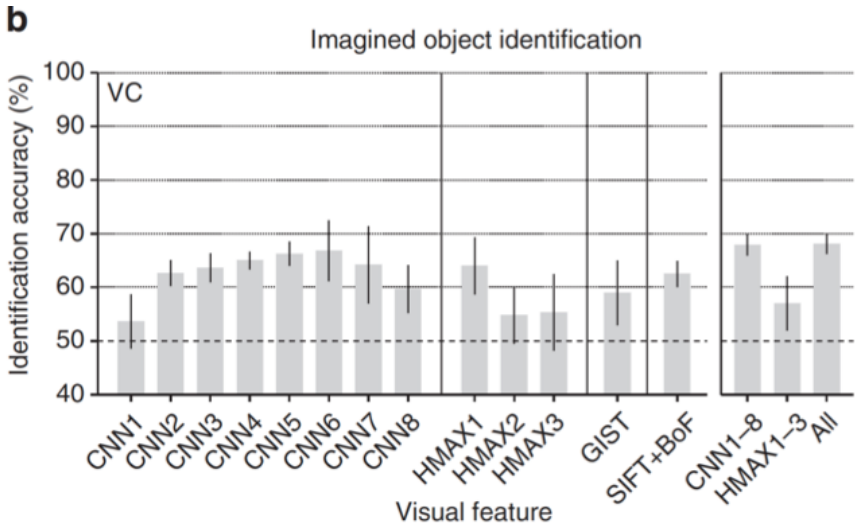




DNNを用いたNeural decoding

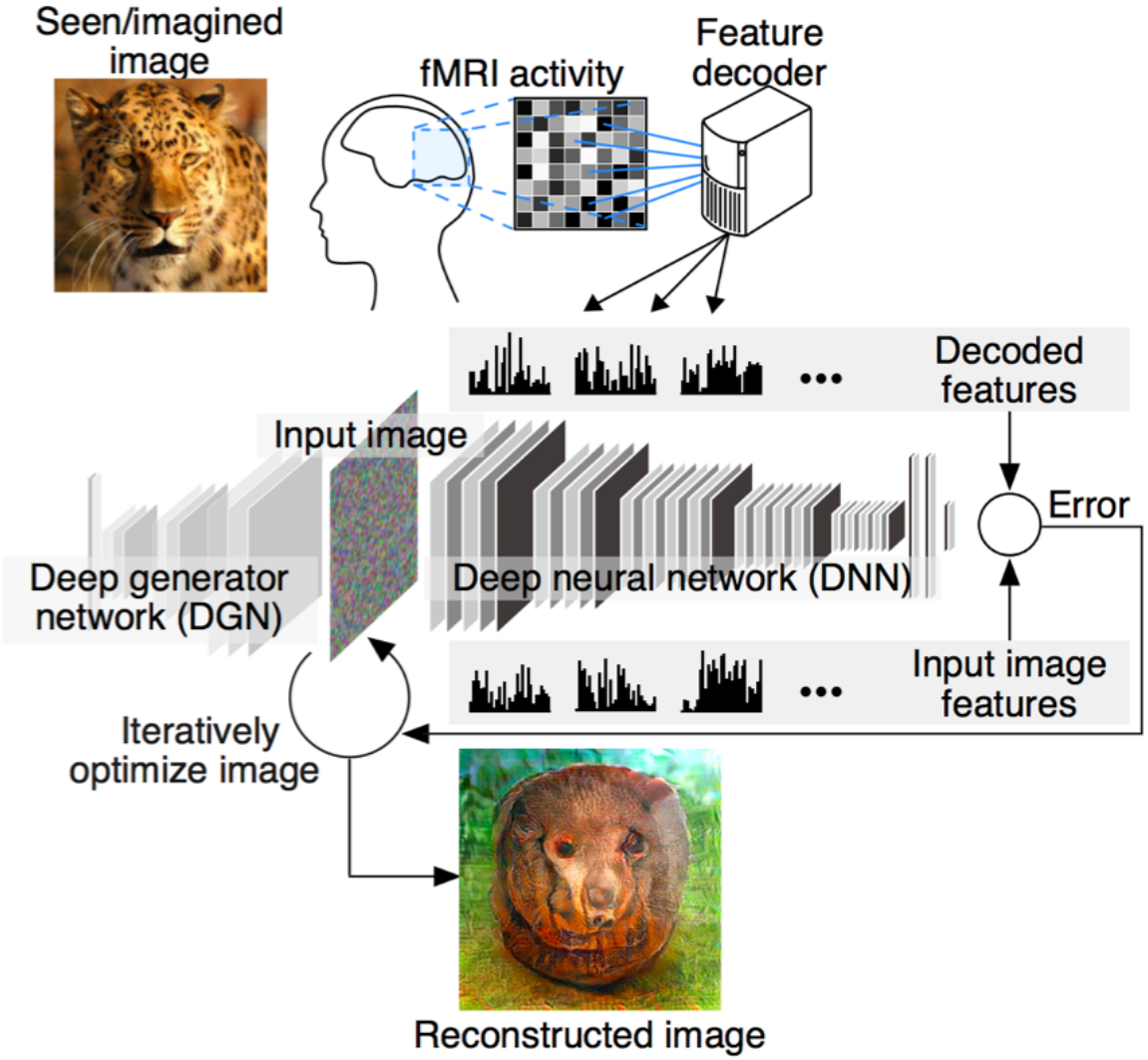


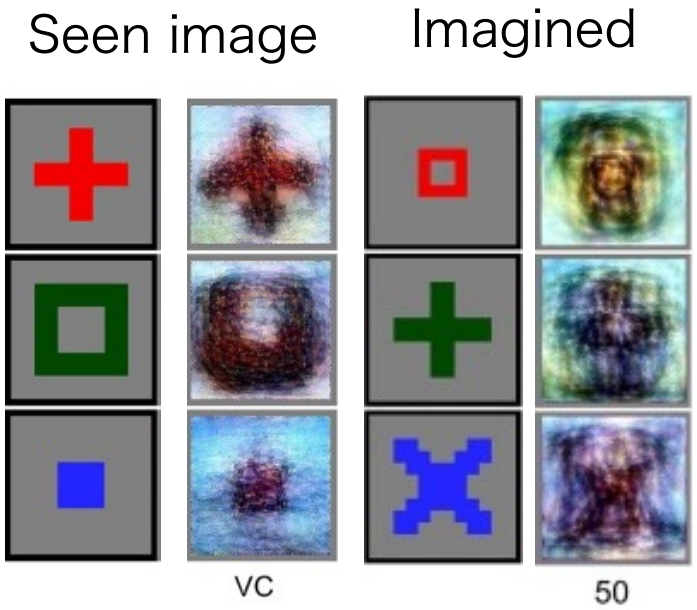




Horikawa et al., Nat. Comm., 2017

fMRI信号からの画像再構成





Shen et al., Plos CB 2019

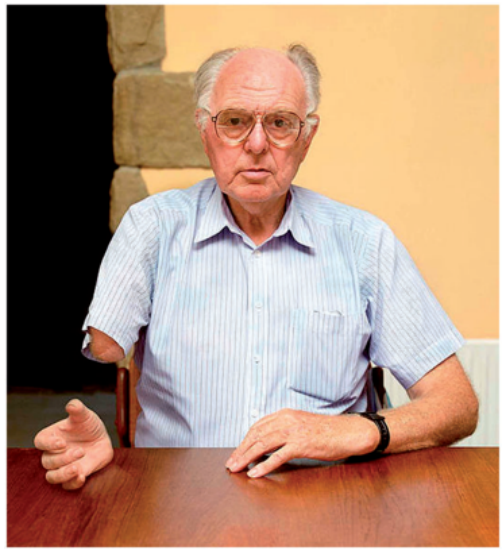
課題

- BCIを介して脳とAIがインタラクションすると脳活動はどう変わる？
- インタラクションを使った医療応用？
- 予期しない副作用はないの？

ETH zurich Cybathlon
https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2015/08/cybathlon-practice-session-success.html

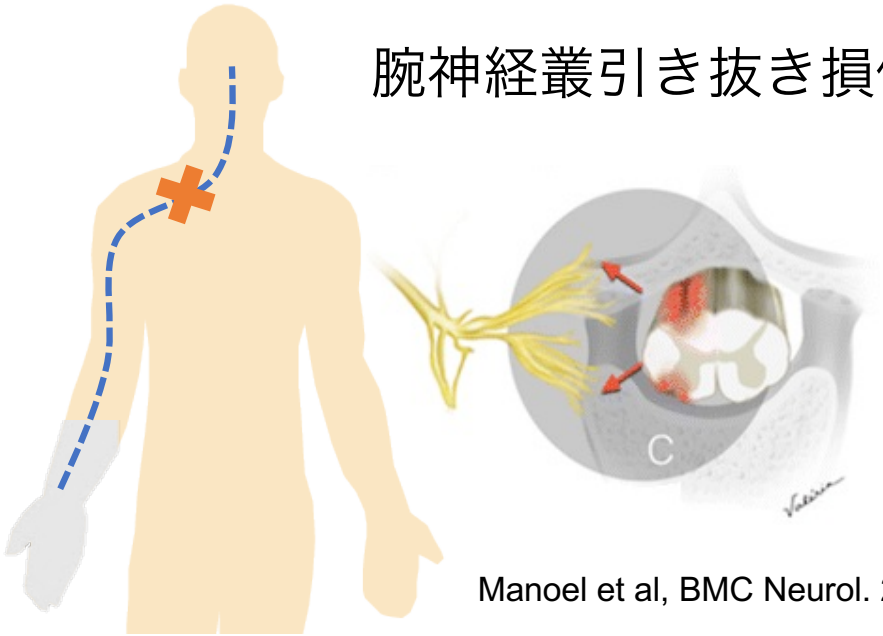
幻肢痛

上肢の切断や神経障害後に生じる難治性の痛み



G. D. Schott, Brain 2014: 137; 960–969

5,000 切断肢/年（日本）
50-80%に幻肢痛



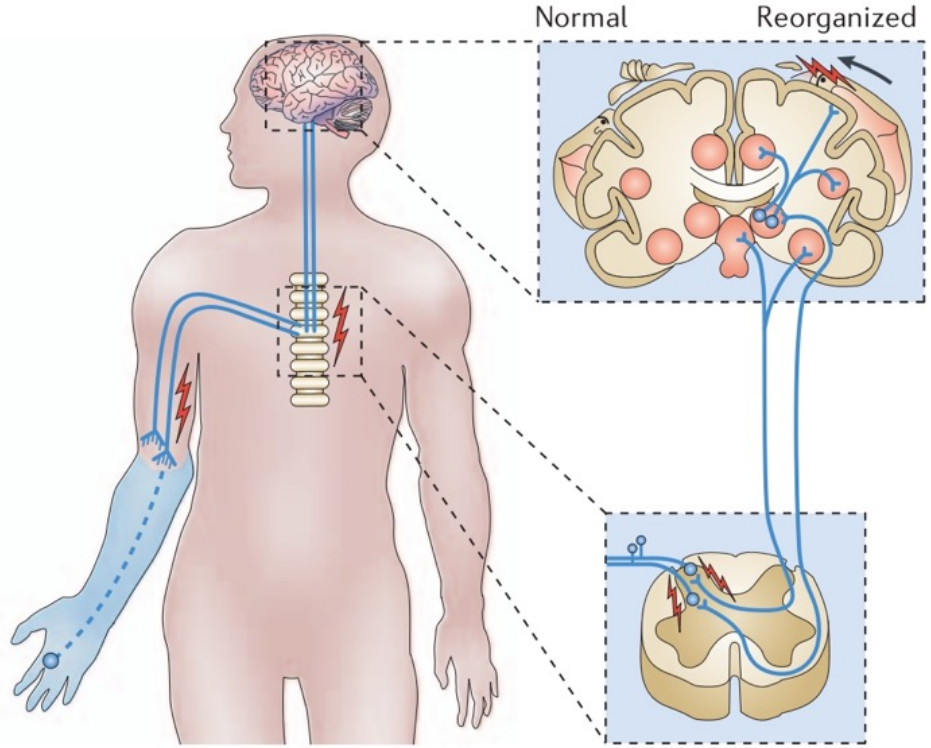
Manoel et al, BMC Neurol. 2015

手はあるが感覚がなく動かない

有効な薬物療法がない

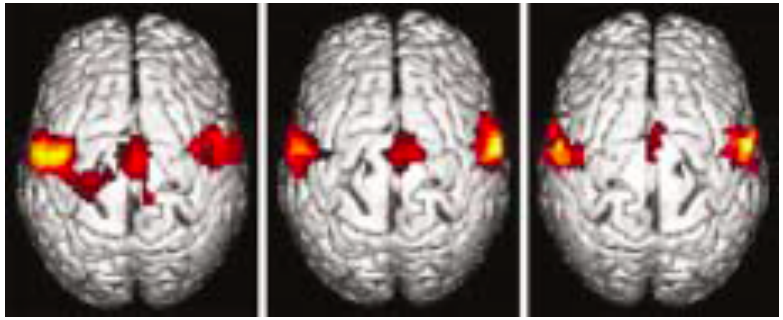
Alviar et al, Cochrane Database Syst Rev., 2016

幻肢痛は脳活動の異常から生じる？



H.Flor et. al, Nat. Rev. Neurosci., 2006

唇を動かす課題中の脳活動（fMRI)

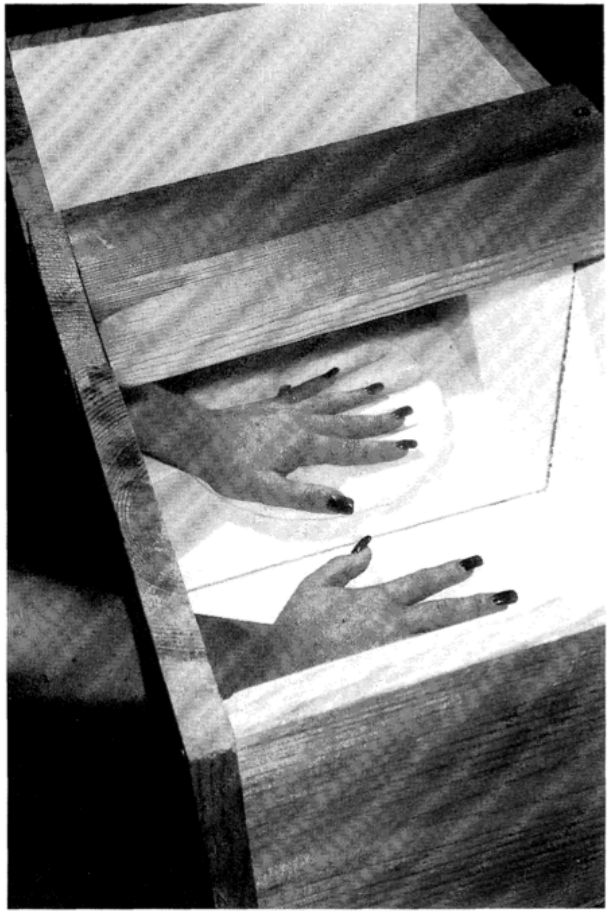


幻肢痛　痛みのない切断肢　健常者

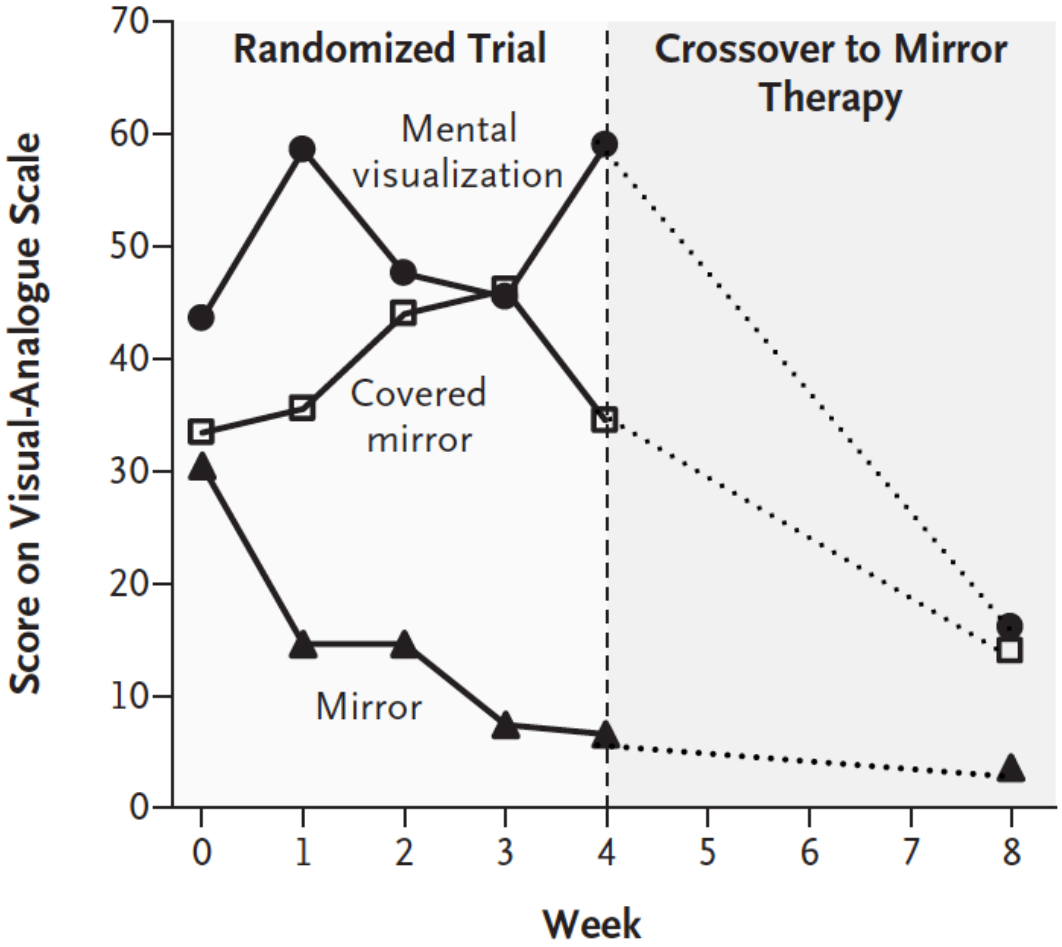
H. Flor et al, Nat Rev Neurosci, 2006

幻肢に関連する感覚運動野の活動が痛みに関連すると考えられ、これを修飾する治療が行われてきた

鏡療法（幻肢の脳活動を強化）

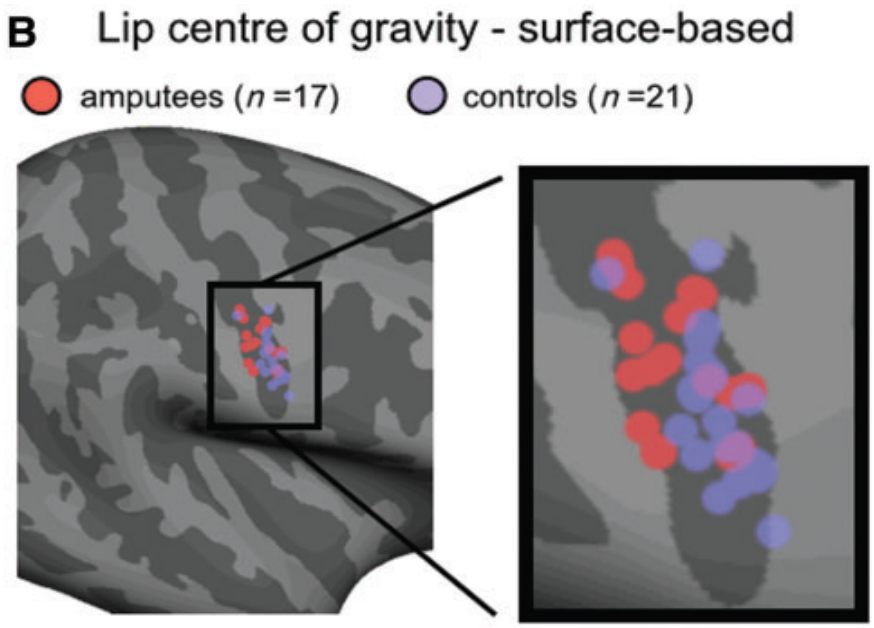


Ramachandran et al., Proc. R. Soc. Lond. B, 1996



Chan BL, N Engl J Med 2007; 357: 2206-07

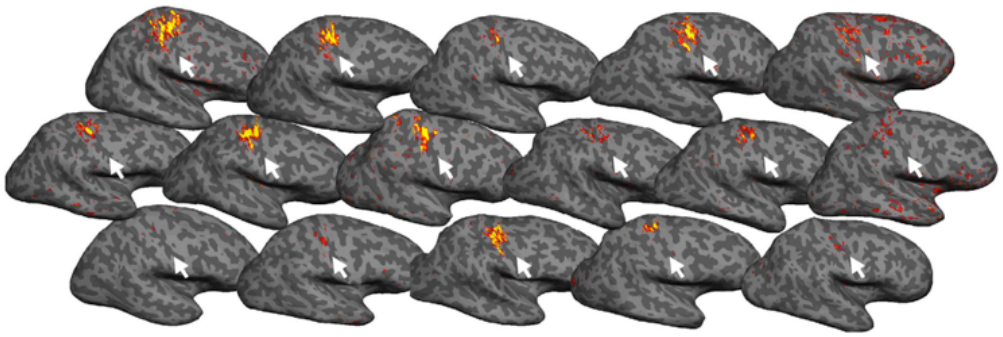
幻肢痛は脳活動の異常から生じる？



H.Florの結果は再現されず

T. Makin et al, Brain, 2015

強い痛み



弱い痛み

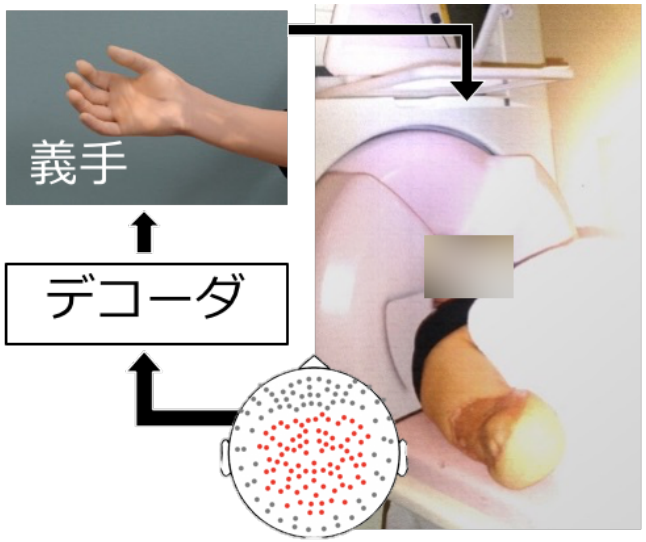
T. Makin et al., Nature communications 2012

幻肢の運動表象は強めるべきか弱めるべきか？

幻肢痛に対するBCI治療

BCIを使うことで幻肢運動情報に可塑的変化を誘導し
痛みとの関係を調べる

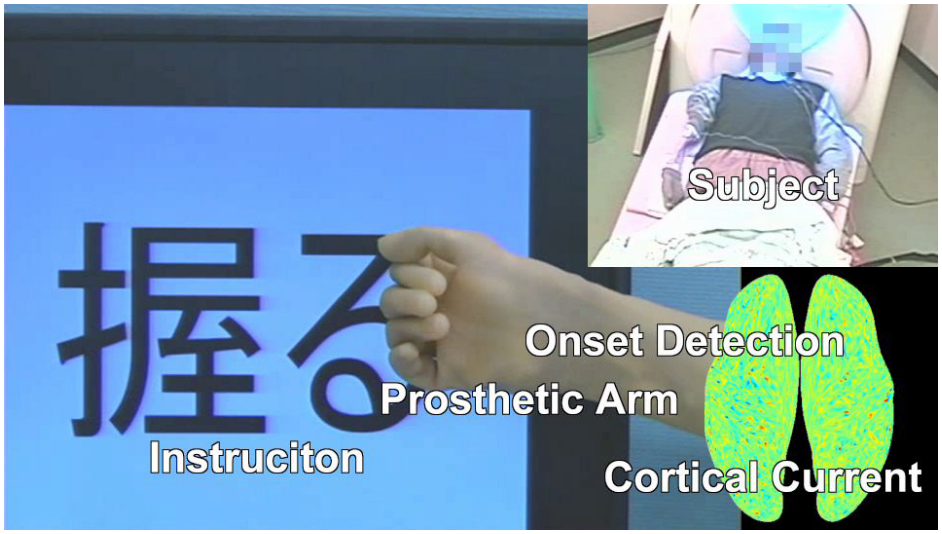
モニタ越しに義手
の動きを確認



デコーダ

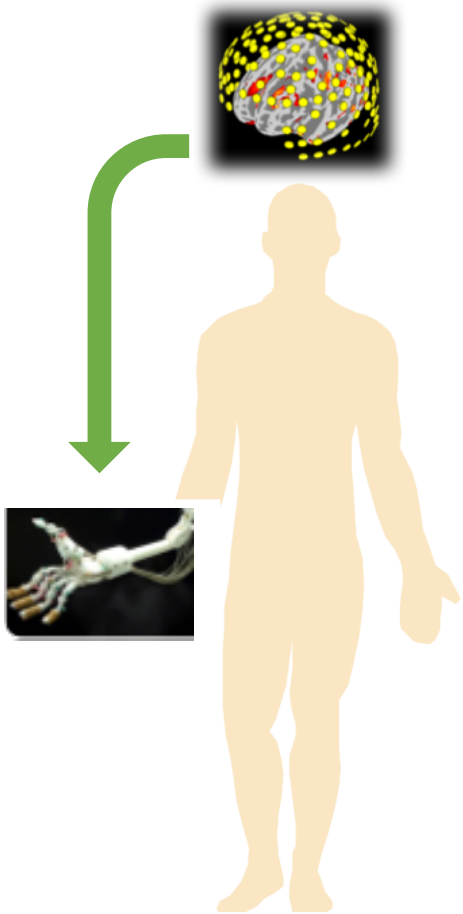
患者は幻肢を動かすつもりで
義手を操作し、１０分間で操
作に習熟するよう指示される

腕の動きを念じることで
ロボットを制御



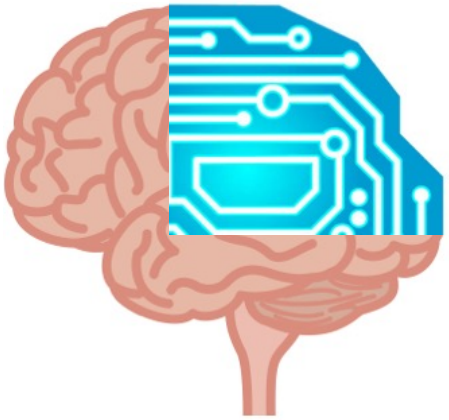
Fukuma et al., Front. Neurosci., 2018
Fukuma et al., Scientific Reports, 2016
Fukuma et al., PLoS One, 2015

仮説



BCI

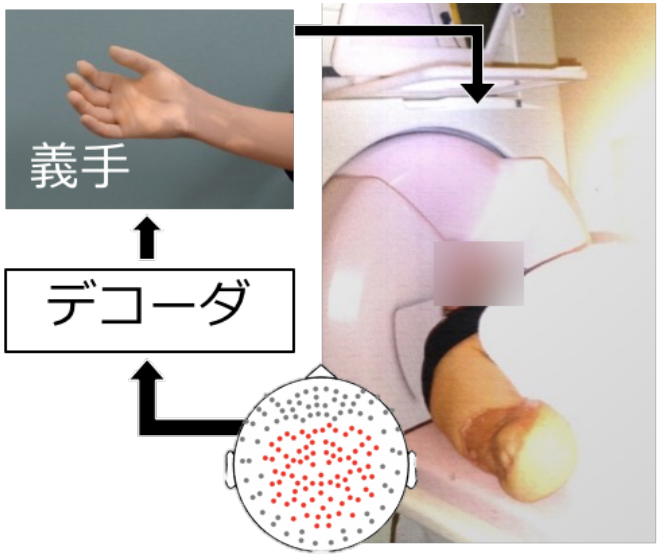
- 幻肢運動に関する感覚運動野の活動に可塑的変化
- 痛みの変化



機能の補填（BCI）
⇒ 痛みの治療？

仮説:
幻肢の脳活動でBCIを制御することで幻肢運動情報が強くなり痛みが減弱する

実験条件



患者は幻肢を動かすつもりで義手を操作し、１０分間で操作に習熟するよう指示される

幻肢を動かす際の脳活動を計測 (pre-BMI)

痛みを評価 (VAS, SF-MPQ2, pre-BMI)

BMI トレーニング(10分間):
1) 幻肢運動デコーダ, 2) ランダムデコーダ

痛みを評価 (VAS, SF-MPQ2, post-BMI)

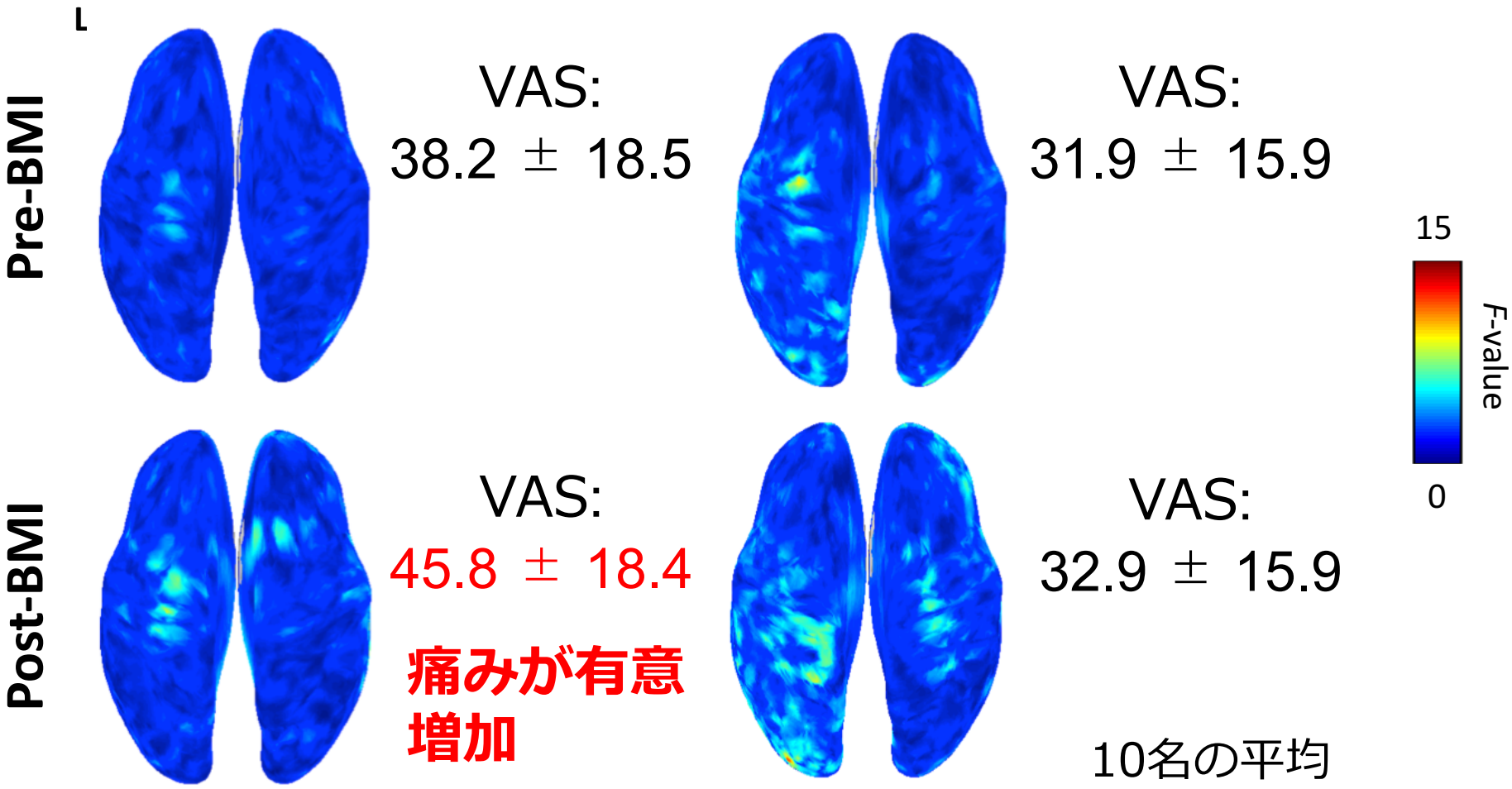
幻肢を動かす際の脳活動を計測 (post-BMI)

幻肢運動デコーダ；幻肢を動かす時の脳磁計信号のパターンを学習したデコーダ。幻肢を動かそうとする時の脳活動を検知し、同じ動きをロボットにさせる

ランダムデコーダ；幻肢を動かす時の脳磁計信号と動きとの対応関係をランダムにして、学習させたデコーダ。運動の開始を検知できるが、種類を推定できない

幻肢運動時の活動がBCI訓練前後で変化

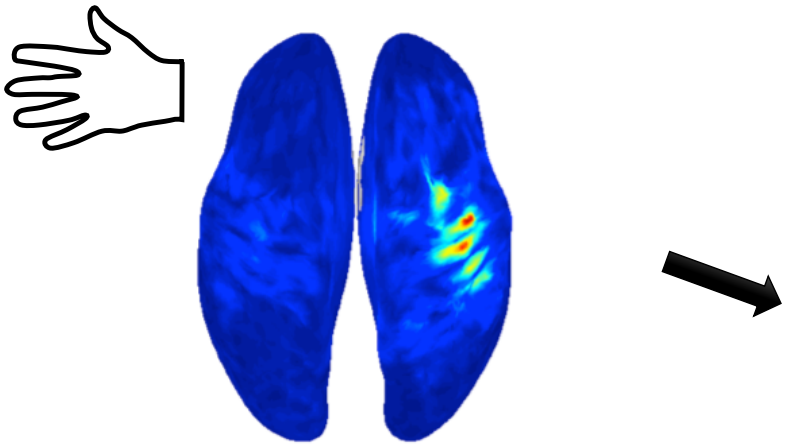
幻肢運動デコーダ　　ランダムデコーダ



10名の平均
患側は左へ統一

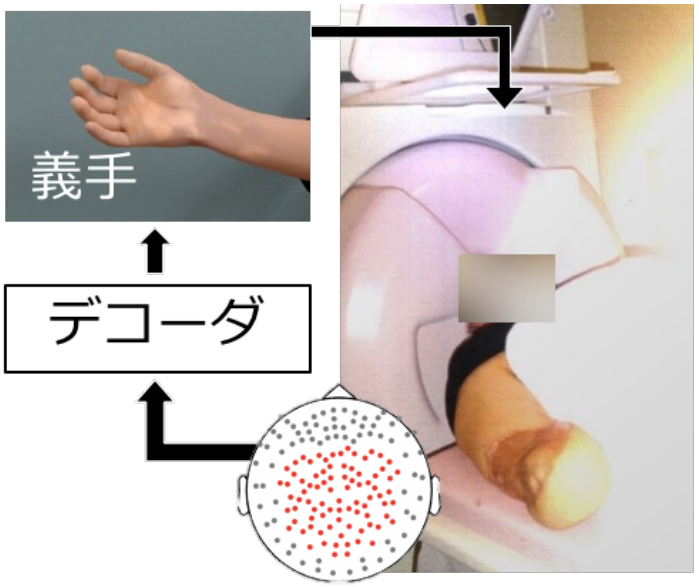
当初の仮説に反して、幻肢運動のdecoding精度改善を伴うBCI訓練は痛みを増悪させた

３つめのBCI訓練



健常肢運動デコーダ

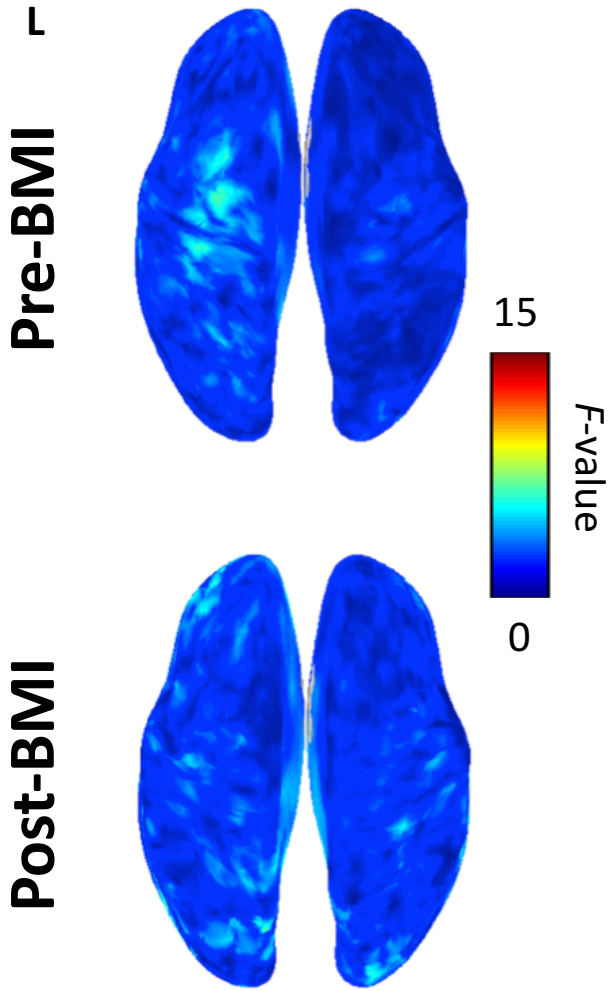
健常肢を動かす時の脳磁計信号のパターンを学習したデコーダ。健常肢を動かす時のパターンを検知し、ロボットの動きに変換する



患者は幻肢を動かすつもりで義手を操作し、１０分間で操作に習熟するよう指示される

患者は幻肢を動かそうと考えながら、この義手の操作を試みる。BMI義手は健常肢の脳活動パターンに近い活動が出ると動くため、患者は幻肢を動かそうとしながら、健常肢の脳活動パターンを学習することになる。

幻肢の運動毎の皮質電位の変化が少なくなり痛みが低下



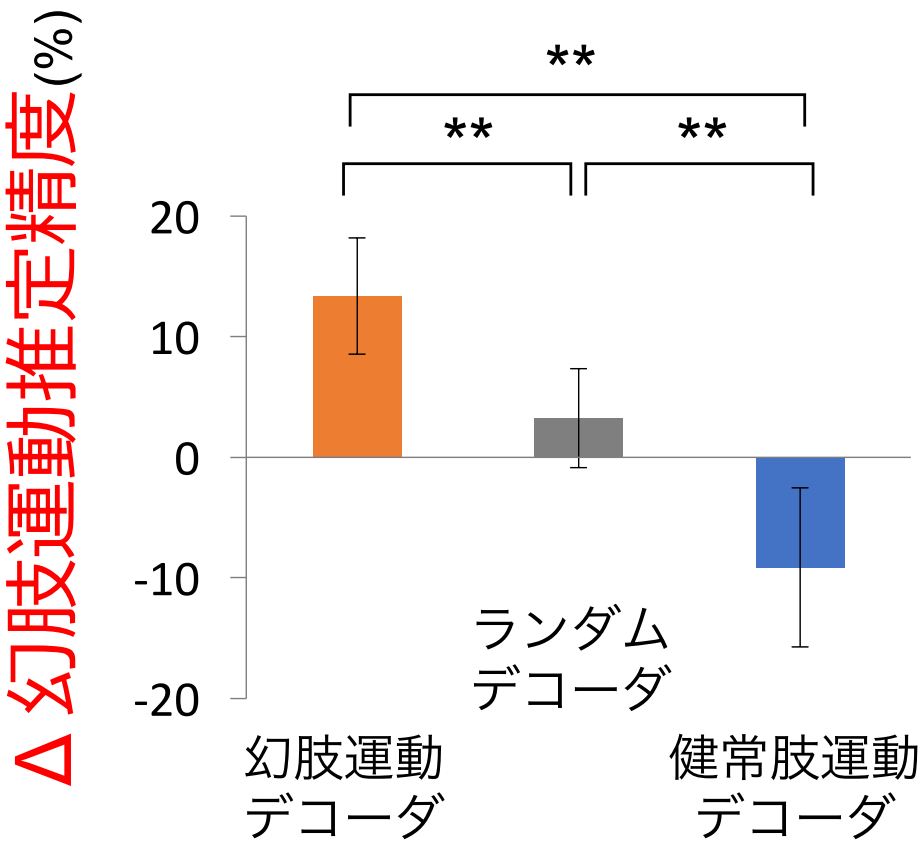
VAS:
38.3 ± 15.5

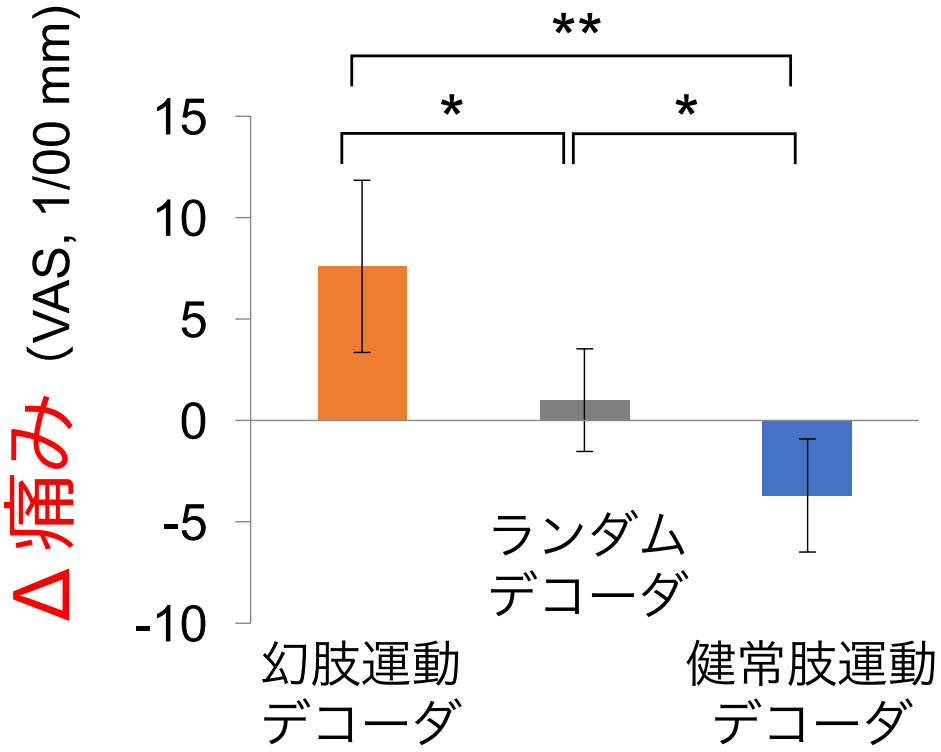
VAS:
34.6 ± 14.8

n = 10

幻肢運動のdecoding精度の低下を伴う訓練では、
痛みが低下した

BCI訓練により幻肢運動情報と痛みが変化



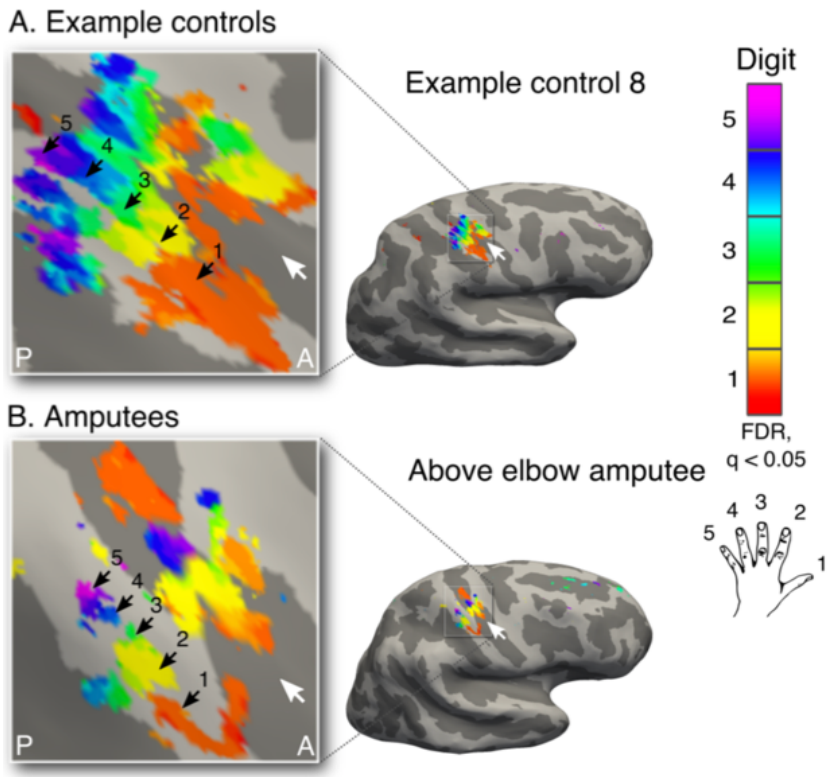


T. Yanagisawa et al., Nature Communications., 2016

n=10, **p*<0.05, ***p*<0.01, two-tailed Student's *t*-test

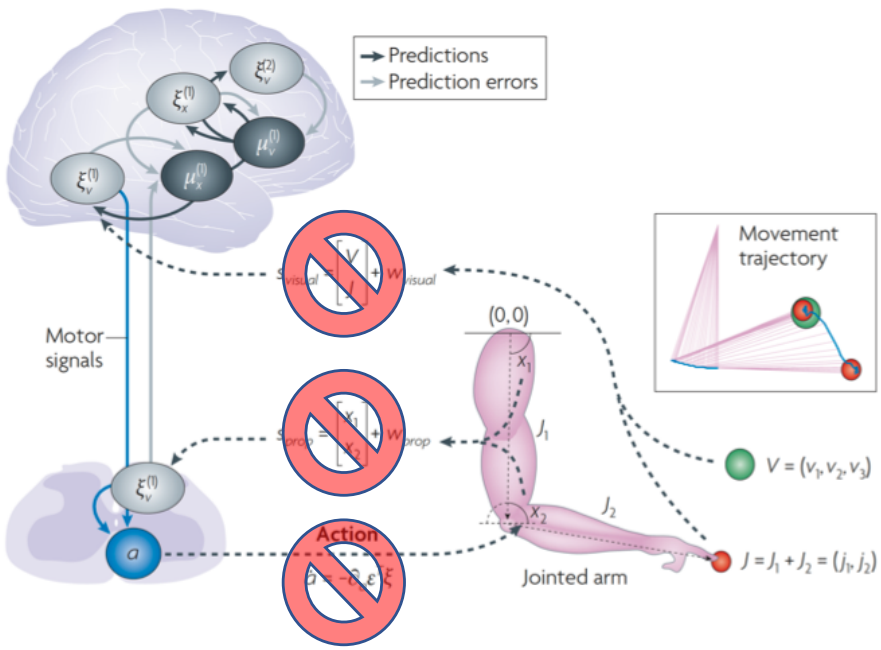
残存する幻肢運動表象が痛みの原因？

幻肢痛患者でも運動表象が残存



Kikkert et al., eLife, 2016

自由エネルギー(予測誤差）が増加!



Friston, Nat Rev Neuro., 2010

まとめ3

- Decoder(AI)を変えることで、脳活動の変化する方向を制御し、痛みを制御できた
- 脳活動とAIとの関係によっては、痛みの増悪など予期しない副作用を生じることがある
- AIを選ぶことで脳活動の可塑的変化を制御し、幻肢痛を治療できると期待される

課題に対する答え？

- ✓BCIを介して脳とAIがインタラクションすると脳活動はどう変わる？
  - ✓AIの内部表現に応じて脳活動も可塑的に変化する
- ✓インタラクションを使った医療応用？
  - ✓幻肢痛など痛みの治療に応用可能
  - ✓精神疾患を中心に研究が進んでいる
- ✓予期しない副作用はないの？
  - ✓AIによっては痛みが増悪してしまう

結論

1. 侵襲的BCIの臨床応用は現実的な課題となった
2. 特にclosed-loopシステムは脳とAIの新しいインタラクションを実現すると期待される
3. BCIを介した脳とAIのインタラクションは、脳の理解や、新たな治療への応用が期待される
4. 脳への影響について慎重な研究が必要である

Acknowledgements

Collaborators:

Osaka University
Haruhiko Kishima
Youichi Saitoh
Ryohei Fukuma
Kouichi Hosomi
Shouta Yamamoto
Masataka Tanaka
Masayuki Hirata
Toshiki Yoshimine

Kyoto University
Yukiyasu Kamitani

UEC
Yokoi Hiroshi

CiNet
Ben Seymour
Shinji Nishimoto

Lab members

Funding:

CREST ERATO Brain/MINDS 脳PRO

一緒に研究しませんか？

contact: takufumiy@gmail.com