

■ 本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

* : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I から IV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2015, 神谷之康

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2015, Yukiyasu Kamitani

ブレイン・デコーディングと ブレイン-マシン・インターフェース

京都大学 / **ATR**脳情報研究所

神谷之康

神谷之康 (かみたにゆきやす)

- ・ 1970年、奈良県桜井市生まれ
- ・ 東京大学教養学部教養学科卒業 (認知行動科学・ 科学哲学)
- ・ カリフォルニア工科大学博士課程修了 (Ph.D, Computation and Neural Systems)
- ・ ハーバード、プリンストン大学を経て、2004年よりATRに勤務
- ・ 2008年、ATR・ 神経情報学研究室・ 室長 (NAIST客員教授)
- ・ 2015年4月、京都大学大学院情報学研究科・ 教授
- ・ 受賞 : Scientific American 50、朝日21関西スクエア賞、塚原仲晃賞、日本学術振興会賞、大阪科学賞、他
- ・ twitter:@ykamit

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

ウェブサイト「NHKオンデマンド」(<https://www.nhk-ondemand.jp/>)
ウェブページ: 番組名「サイエンスZERO 心の中が丸見えに！？脳内
イメージ研究最前線」

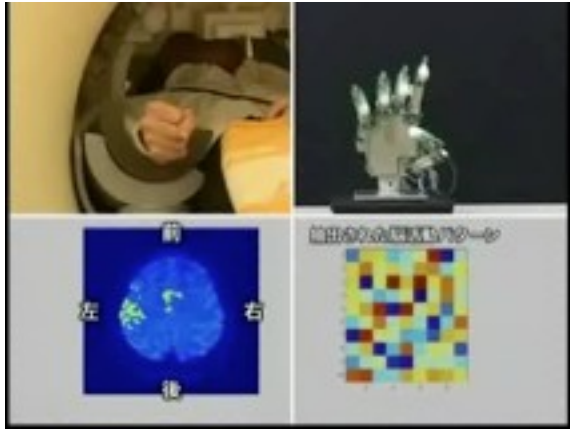
<https://www.nhk-ondemand.jp/goods/G2013048607SA000/>

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

『細胞工学』Vol.34 No.7(2015年7月号)
学研メディカル秀潤社
特集: Decode of the Brain
ヒトの脳を読む新たなアプローチ(監修 神谷之康)
[http://gakken-
mesh.jp/journal/detail/9784780901689.html](http://gakken-mesh.jp/journal/detail/9784780901689.html)

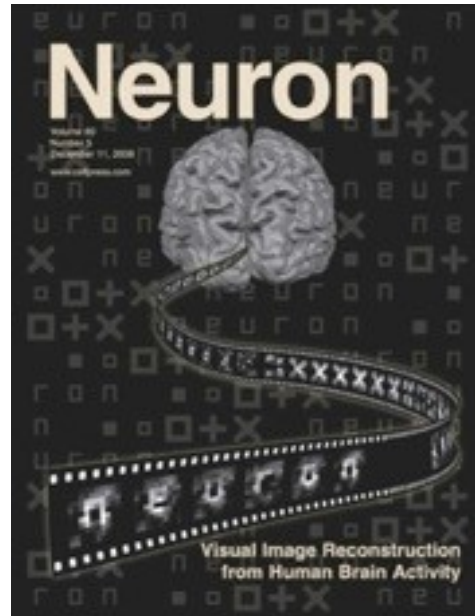
ブレイン・デコーディング

機械学習による脳信号のパターン認識により
行動や心の状態を解読する方法 (Kamitani and Tong, 2005)



ロボット制御 (BMI)

(Kimura, Imamizu, Shimada, Oztop, Harner, Kamitani, 2006)



* 視覚像再構成

(Miyawaki, Uchida, Yamashita, Sato, Morito, Tanabe, Sadato, Kamitani, 2008)



* ©いらすとや

夢の解読

(Horikawa, Miyawaki, Tamaki, Kamitani, 2013)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

いじわるばあさんの画像
長谷川町子『いじわるばあさん』
NO.4, 姉妹社 (1963)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

いじわるばあさんの画像
一コマ目：事故にあい医者に行く
長谷川町子『いじわるばあさん』
NO.4, 姉妹社 (1963)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

いじわるばあさんの画像
ニコマ目：脳波を取ることになる
長谷川町子『いじわるばあさん』
NO.4, 姉妹社 (1963)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

いじわるばあさんの画像
三コマ目：脳波を取る様子
長谷川町子『いじわるばあさん』
NO.4, 姉妹社 (1963)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

いじわるばあさんの画像
四コマ目：脳波に「ヤブにわかるか」
と文字が出てくる
長谷川町子『いじわるばあさん』
NO.4, 姉妹社 (1963)

ヤブに
わかるか！



*

©いらすとや

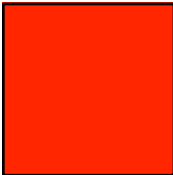
コーディング



デコーディング

コードとは？

後で元に戻せるように変換したもの（暗号）

<u>コンピュータ</u>	A, B, C	→	100 0001 100 0010 100 0011
<u>DNA</u>	アスパラギン酸 ロイシン	→	GAC CUU
<u>ことば</u>		→	「赤」

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

Youtube動画

THE ANATOMY OF THE BRAIN PART 2

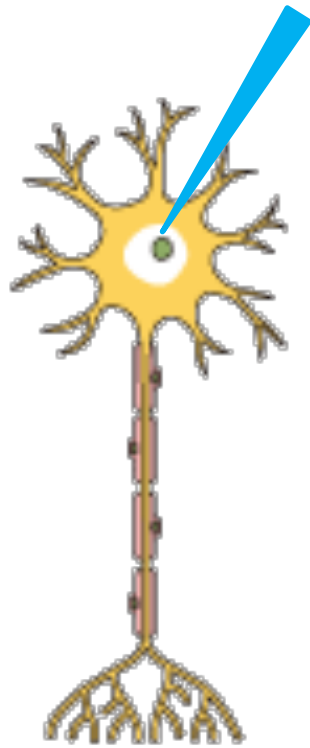
<https://www.youtube.com/watch?v=Qn4NArz385U>

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

Youtube動画

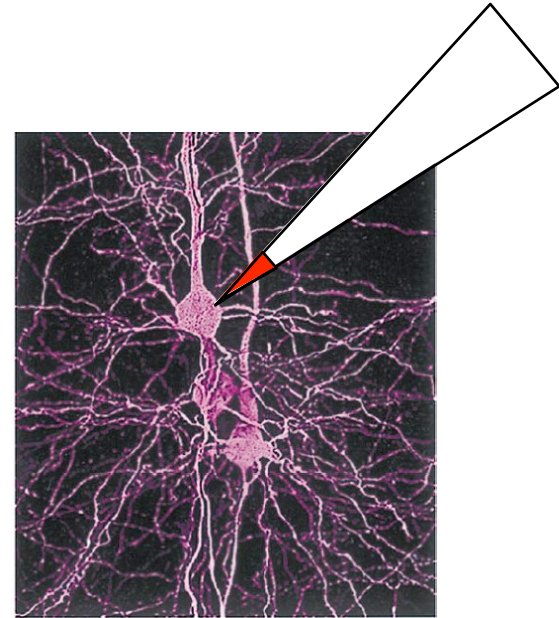
Blue Brain Project - Flying through the column
<https://www.youtube.com/watch?v=cXw3NWj2L-s>

脳活動の計測法 (1) : 電気生理



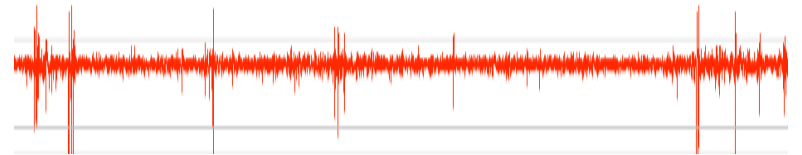
*

研究.net



*

Markram et al. 1998



脳活動の計測法 (2) : 光計測

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

脳活動の光計測模式図

Larry Squire et al. eds. Fundamental
Neuroscience, 2nd edition, Elsevier, 2002.
[http://store.elsevier.com/product.jsp?isbn=97
80080521800&pagename=search](http://store.elsevier.com/product.jsp?isbn=9780080521800&pagename=search)
P744 Fig27 .13

脳活動の計測法（ 3 ）：脳波



神経細胞集団の活動に伴う電流を頭皮上においた電極から計測する

神経細胞集団の活動の時間変化をヒトで調べることが可能になった

例えば、睡眠状態にともなって脳のリズムミクな活動が変化することが明らかになった

脳活動の計測法 (4) :

fMRI (機能的磁気共鳴画像)



神経活動によって誘発された**血流変化**を、水素原子 (プロトン) の分布や水素原子周囲の環境変化に伴う**核磁気共鳴信号**の変化としてとらえ、画像化する方法
小川らによって1990年に報告された脳の構造を調べる技術として使われていたが、神経活動に伴う血流変化をとらえることも可能となり、脳内の**活動部位**を数mmの空間分解能で明らかにすることが可能になった

著作権等の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました

小川誠二氏の肖像

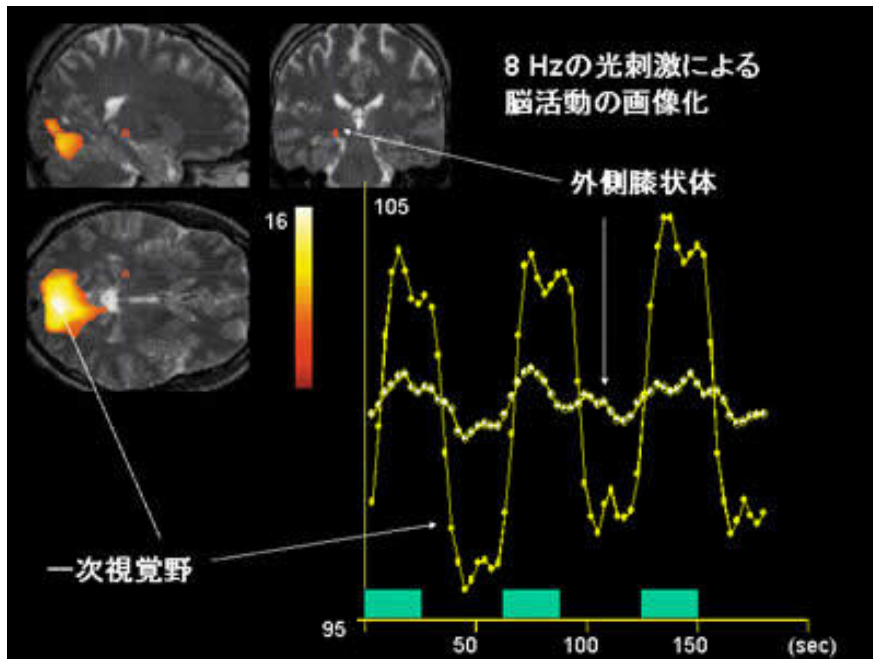
静磁場コイル: 原子核の磁気モメントの方向をそろえる

高周波コイル: 磁場中の原子核にラジオ波信号(励起パルス)を照射し、
放出される信号を観測する

傾斜磁場コイル: 位置情報を付加するため、計測場所により磁場強度をかえる

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

MRIの模式図



神経活動部位では、血管内の血液酸素化の程度に変化（または静脈血の相対的減少）がおこる

これを**BOLD効果**（ Blood oxygenation level dependent ）と呼ぶ

その結果¹Hの分布密度および周囲の環境に変化が生ずるため、MRI信号の変化がおこる

* NIPSシステム脳科学研究領域心理生理学研究部門
定藤研究室
<http://www.nips.ac.jp/fmritms/contents/brain-activation-inspection.html>
図5

MRIによる脳構造の再構成

著作権等の都合により
ここに挿入されていた映像を削除しました

MRIによる脳の解析映像

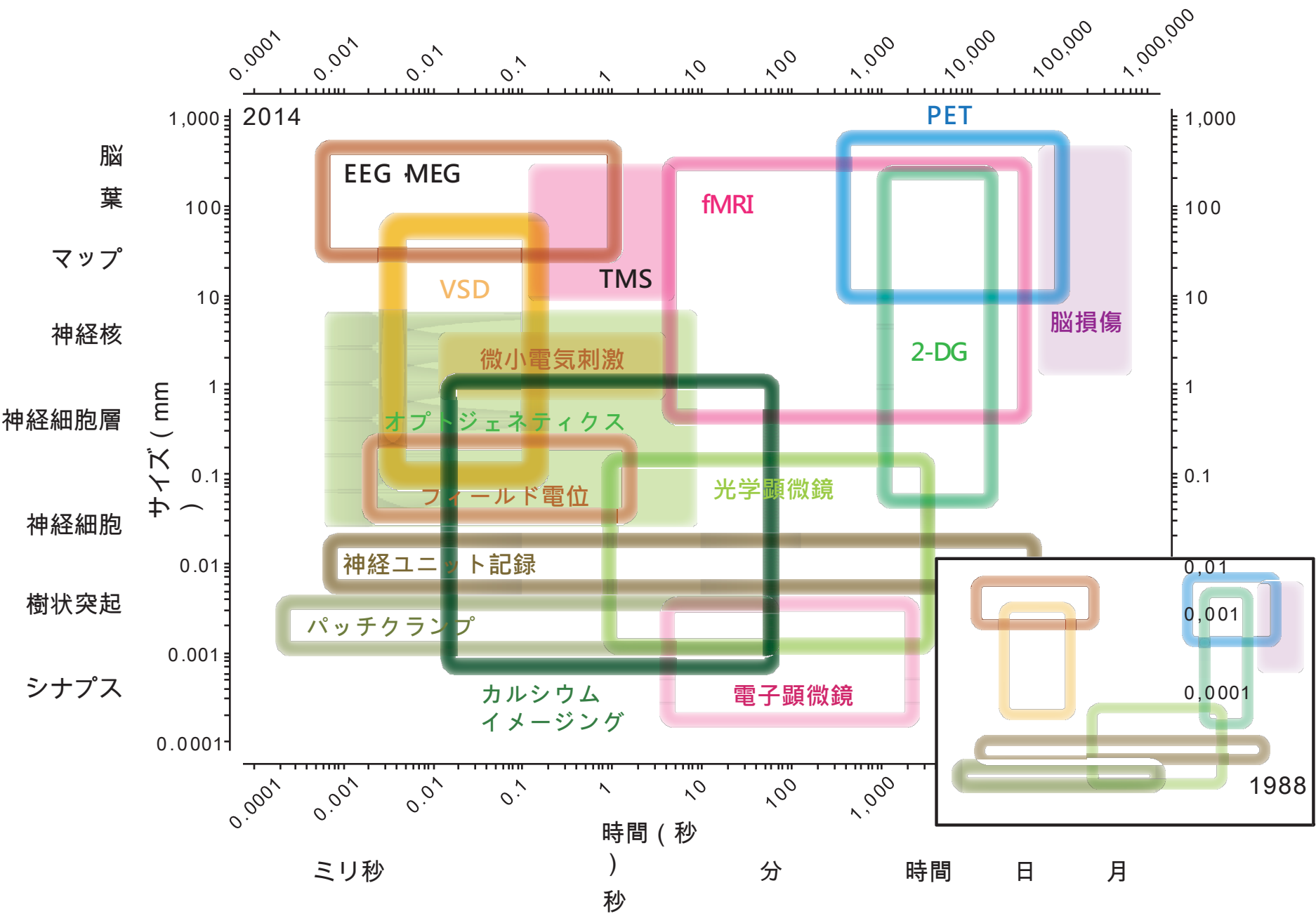
fMRIによる脳活動計測

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた映像を削除しました

fMRIの脳活動計測動画

J boynton

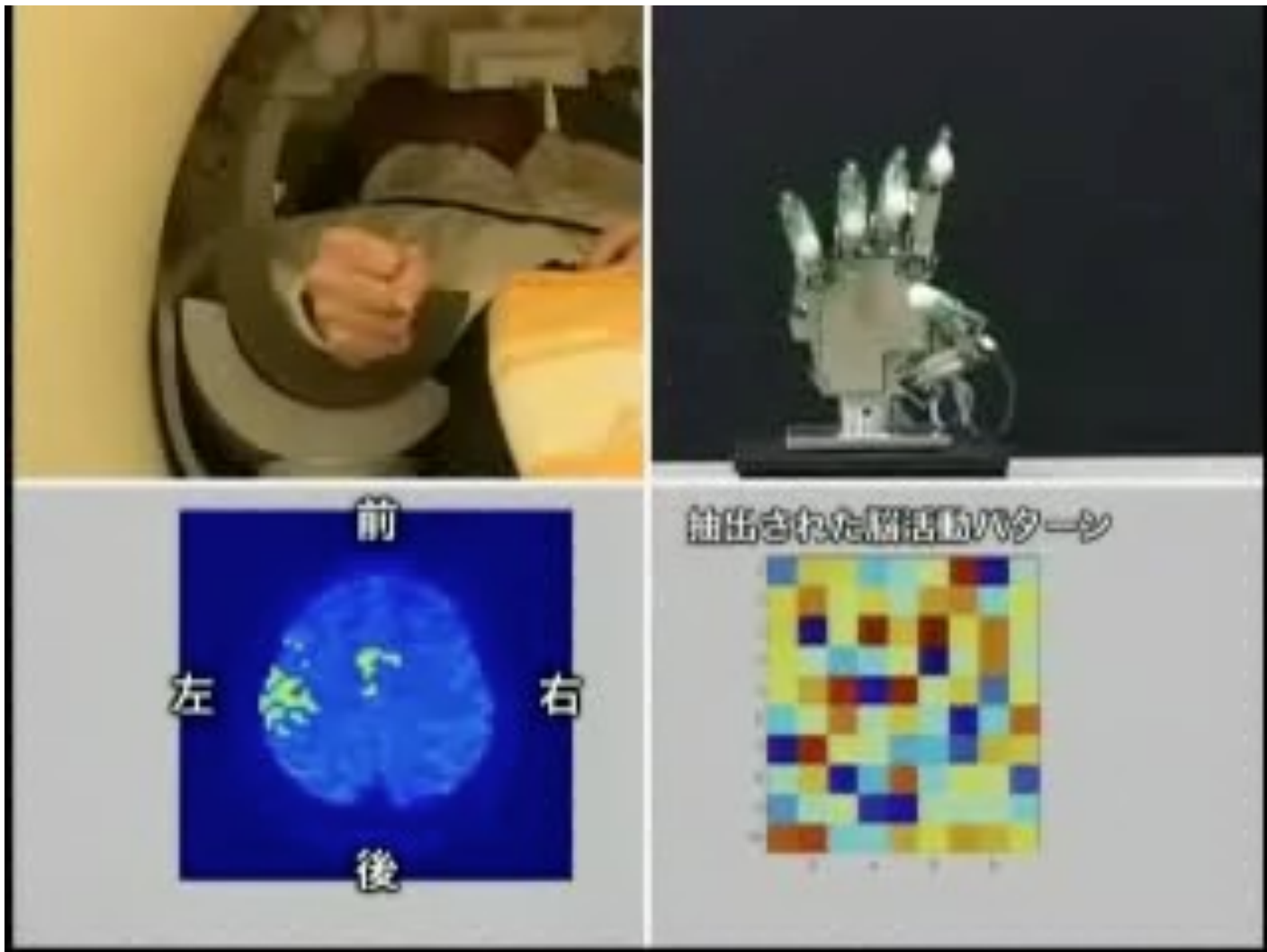
[http://www.cns.nyu.edu/heegerlab/index.php
?page=demos&id=v1mt](http://www.cns.nyu.edu/heegerlab/index.php?page=demos&id=v1mt)



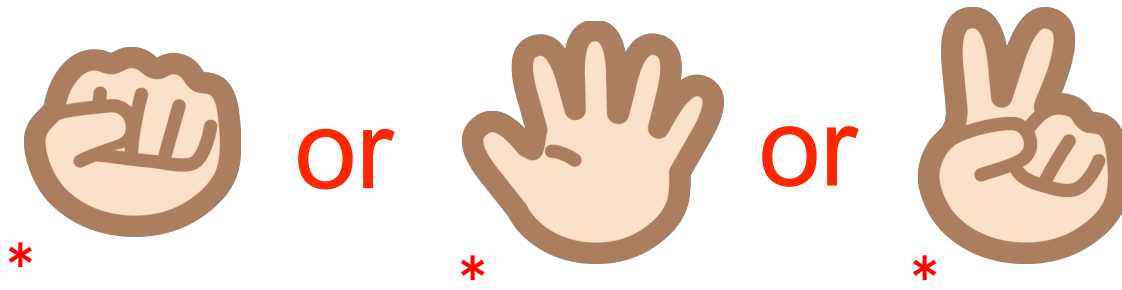
* Sejnowski TJ, et al: Nat Neurosci (2014) 17: 1440-1441

著作権等の都合により
ここに挿入されていた映像を削除しま
した

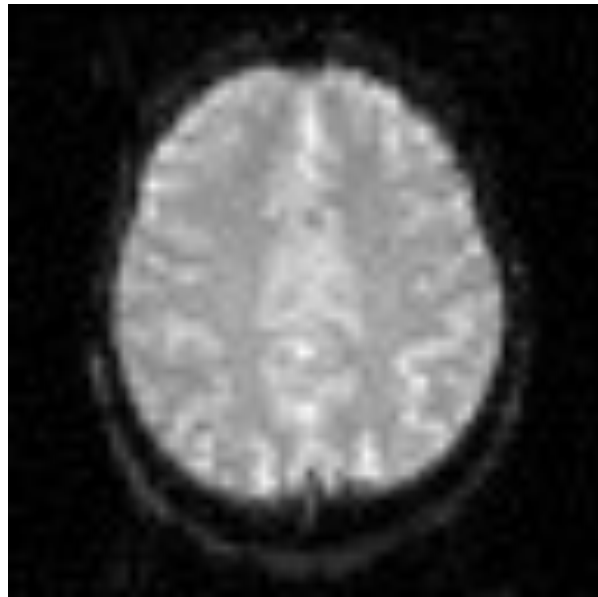
NHKおはよう日本, 2006.5.25

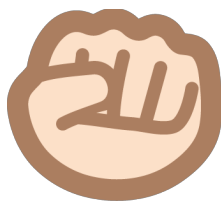


(Kimura, Imamizu, Shimada, Oztop, Harner, Kamitani , 2006)

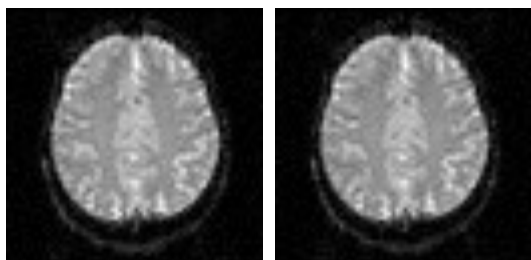
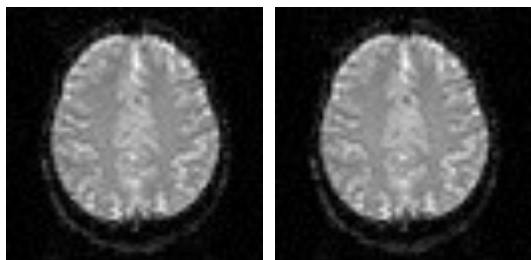


?

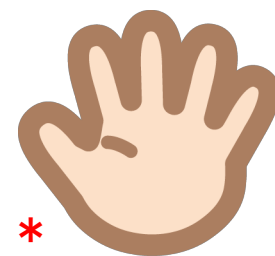
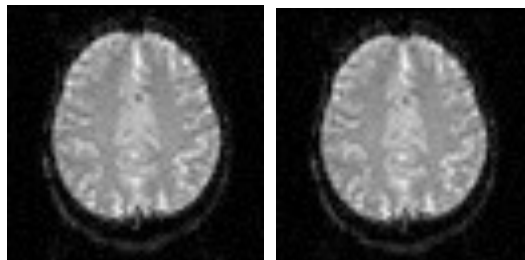
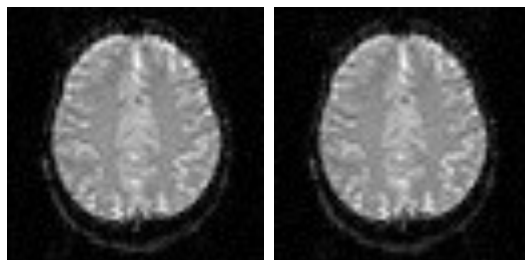




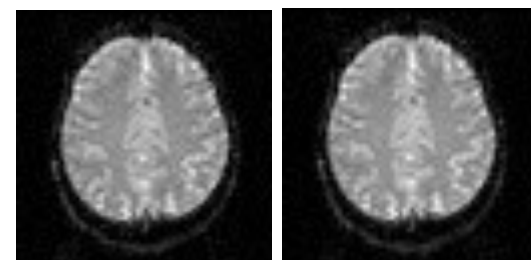
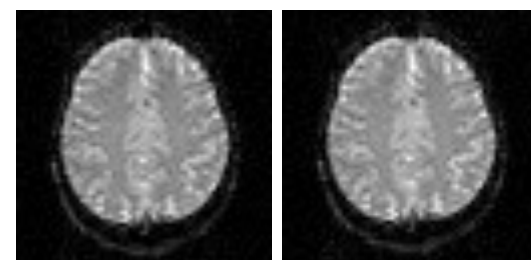
*



*



*



コンピュータに学習させよう！ 機械学習によるデコーディング

(Kamitani and Tong, *Nat Neurosci* 2005)



* @いらすとや

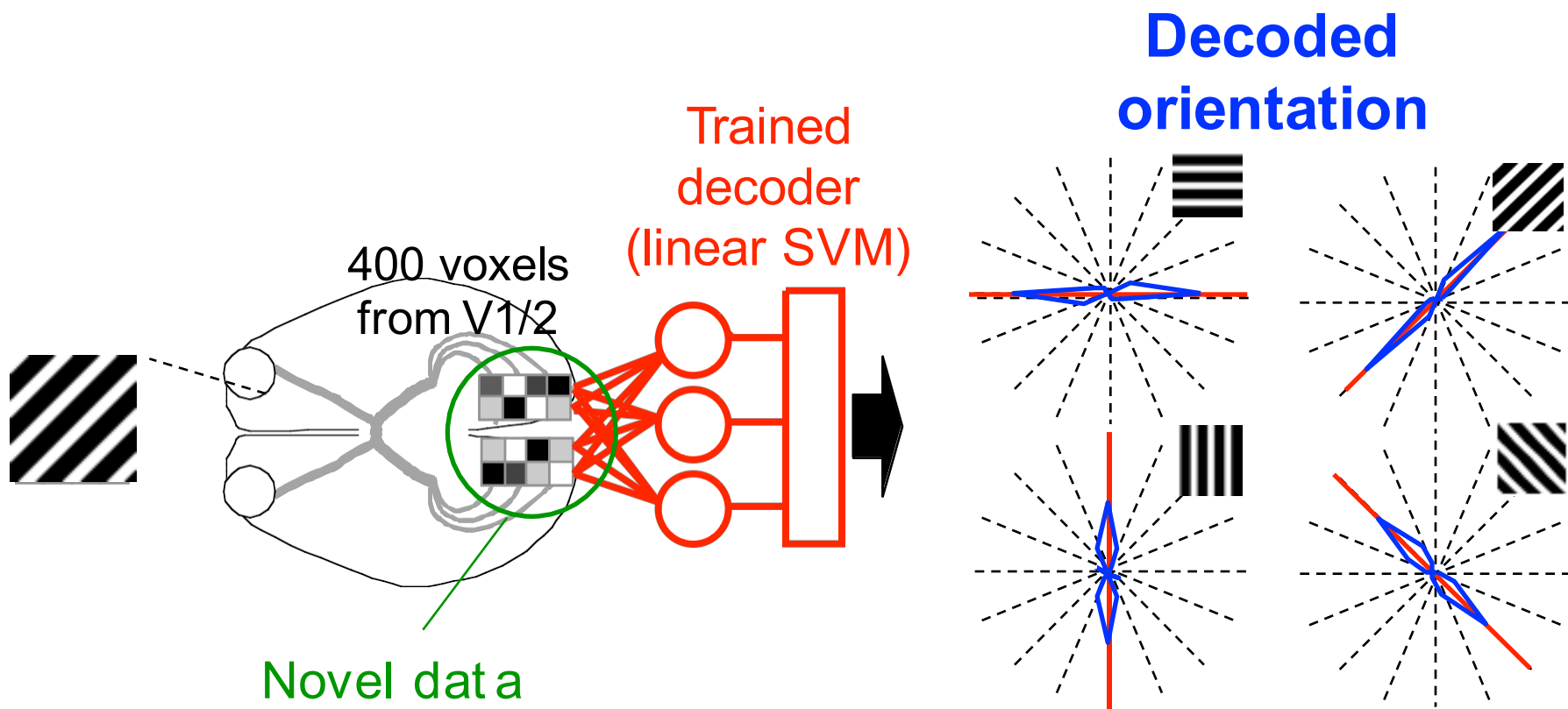
デコーディング



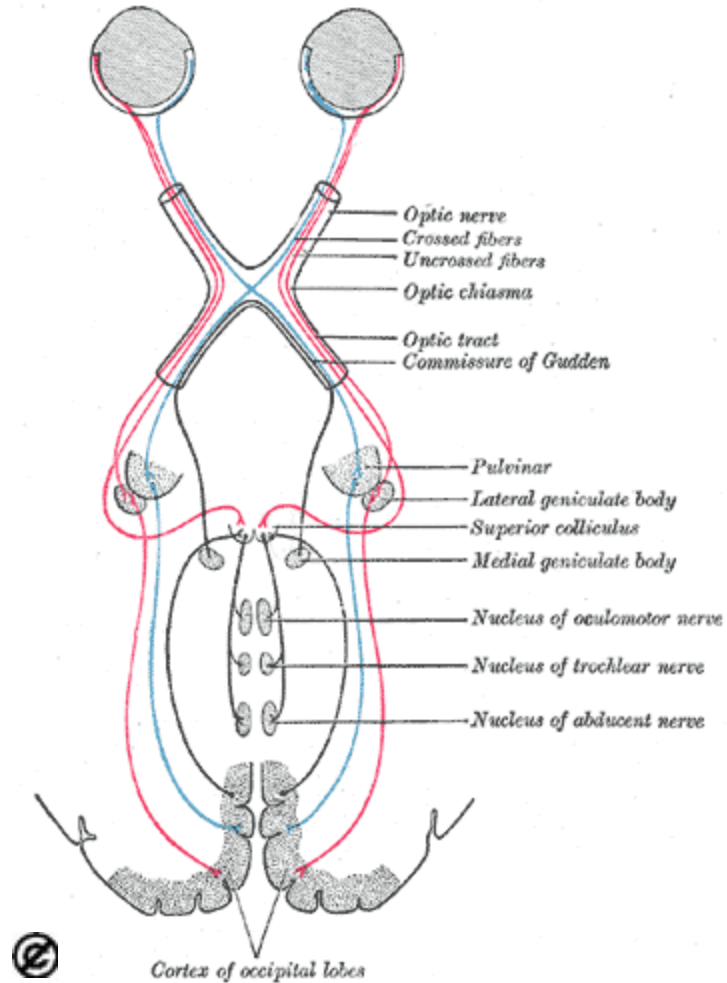
1. 脳活動を計測し「ラベル」をつける
2. 脳活動からラベルを予測する「デコーダ」を構築する
3. そのモデルが新たに与えられる脳活動のラベルを正確に予測できるかを評価する

視覚的方位のデコーディング

(Kamitani and Tong, *Nat Neurosci* 2005; *Curr Biol* 2006; Kamitani and Sawahata, *Neuroimage* 2008; Tong et al. *Neuroimage* 2012)



Visual Pathway



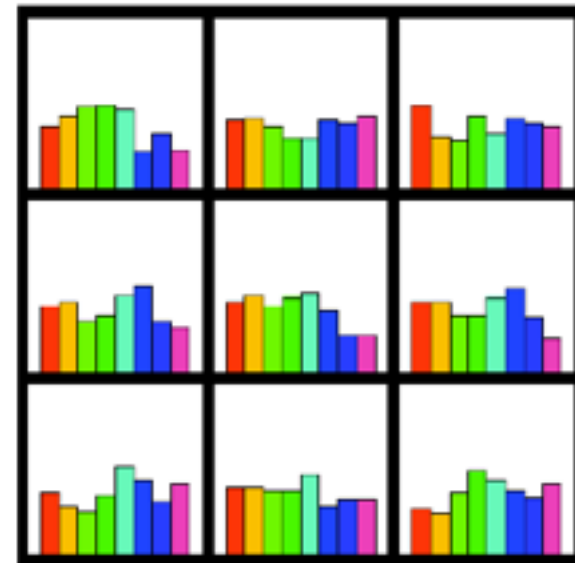
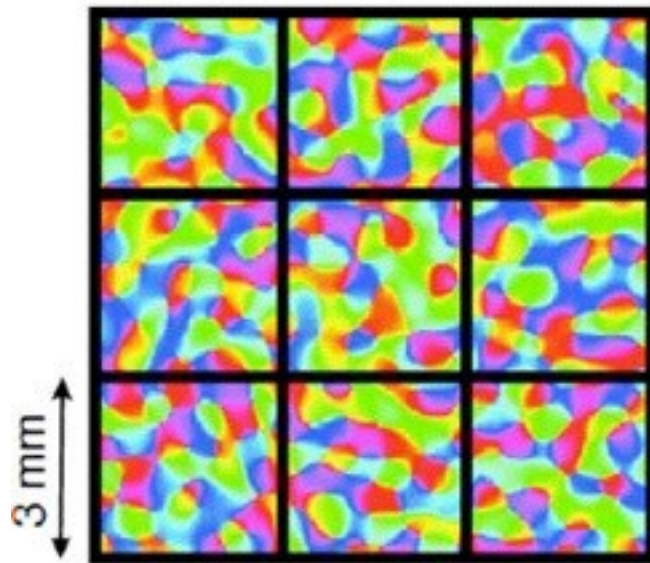
方位選択的ニューロンの計測 (Hubel and Wiesel)

著作権等の都合により
ここに挿入されていた映像を削除しました

方位選択的ニューロン計測動画

Hubel & Wiesel's demonstration of simple, complex
and hypercomplex cells in the cat's visual cortex
<https://www.youtube.com/watch?v=jw6nBWo21Zk>

デコーディングの「超解像」



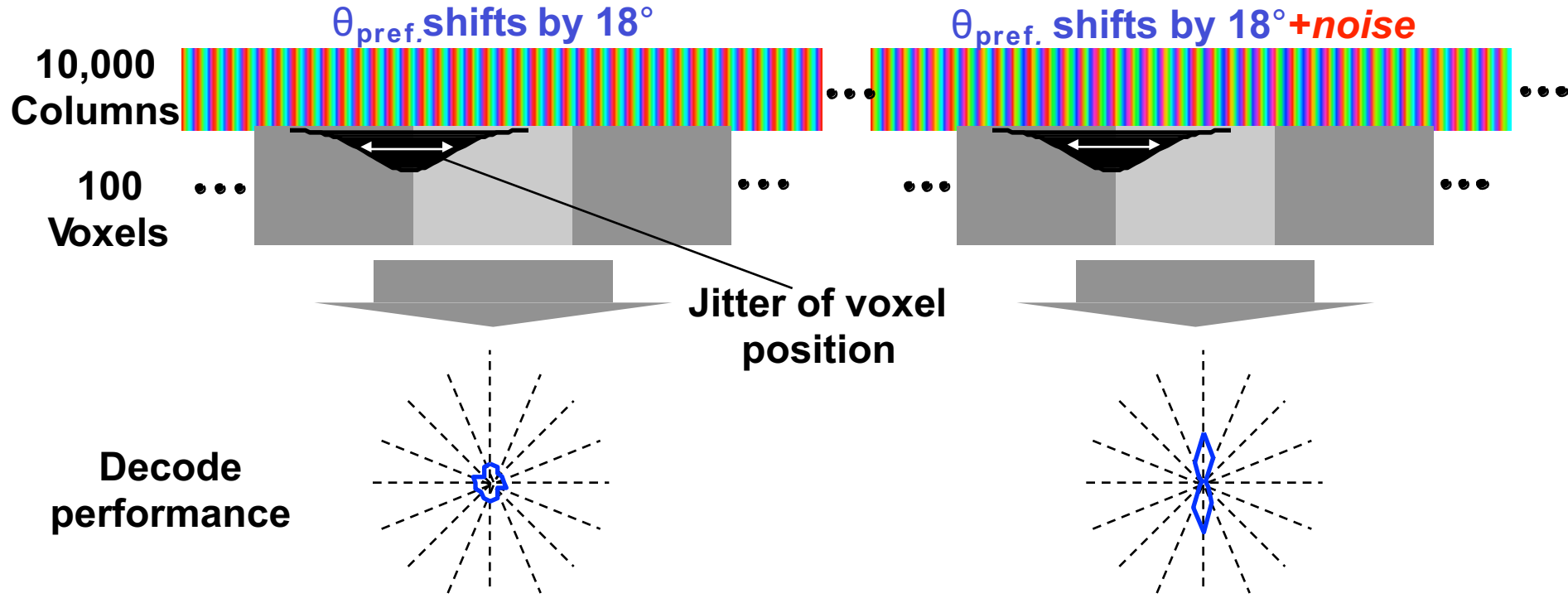
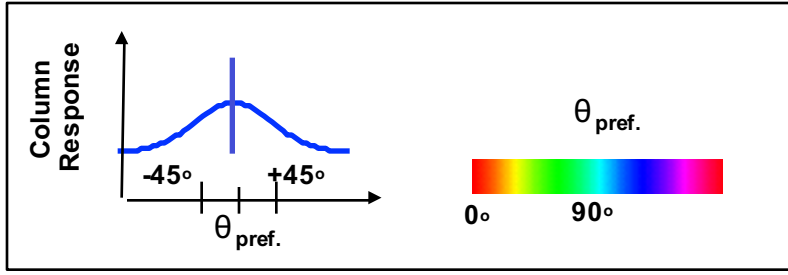
* (cf., Boynton, 2005; Rojer and Schwartz, 1990)

Information from subvoxel representation via random bias of voxel sampling due to irregular columnar and/or vasculature structure (Kamitani and Tong, 2005)

G Boynton (2005) Imaging orientation selectivity: decoding conscious perception in V1, *Nature Neuroscience* 8 (5): 541 - 542, p. 541, Fig. 1: Patterns of orientation-selective responses measured with fMRI.
<http://www.nature.com/neuro/journal/v8/n5/full/nn0505-541.html>
doi:10.1038/nn0505-541

(See also: Op de Beeck, 2009; Kamitani & Sawahata, 2009; Gardner, 2009; Shmuel et al. 2009; Kriegeskorte et al 2009; Mannion et al., 2009; Swisher et al. 2010; Freeman et al. 2011; Clifford et al., 2011; Chaimow et al 2011)

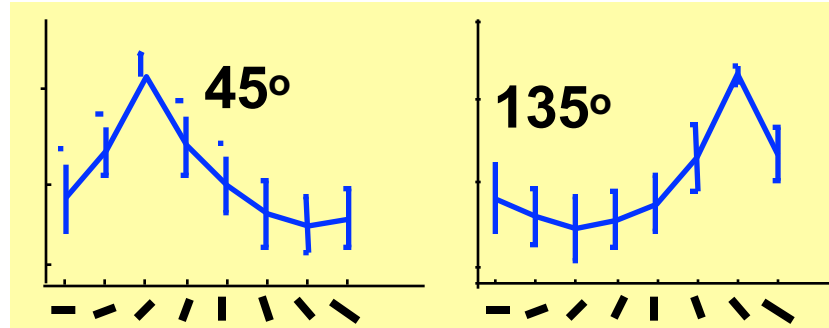
「超解像」のしくみ



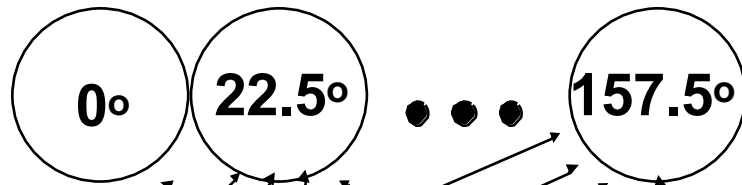
(See also: Op de Beeck, 2009; Kamitani & Sawahata, 2009; Gardner, 2009; Shmuel et al. 2009; Kriegeskorte et al 2009; Mannion et al., 2009; Swisher et al. 2010; Freeman et al. 2011; Clifford et al., 2011; Chaimow et al 2011)

アンサンブル特徴選択性

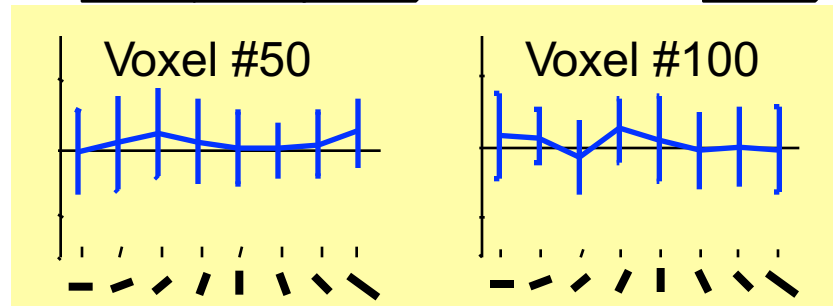
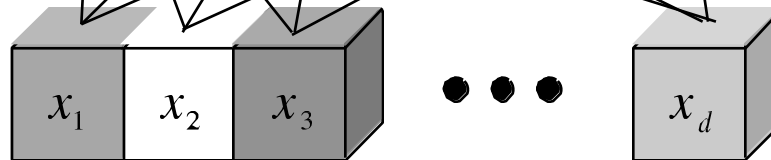
(Kamitani & Tong, 2005, 2006)



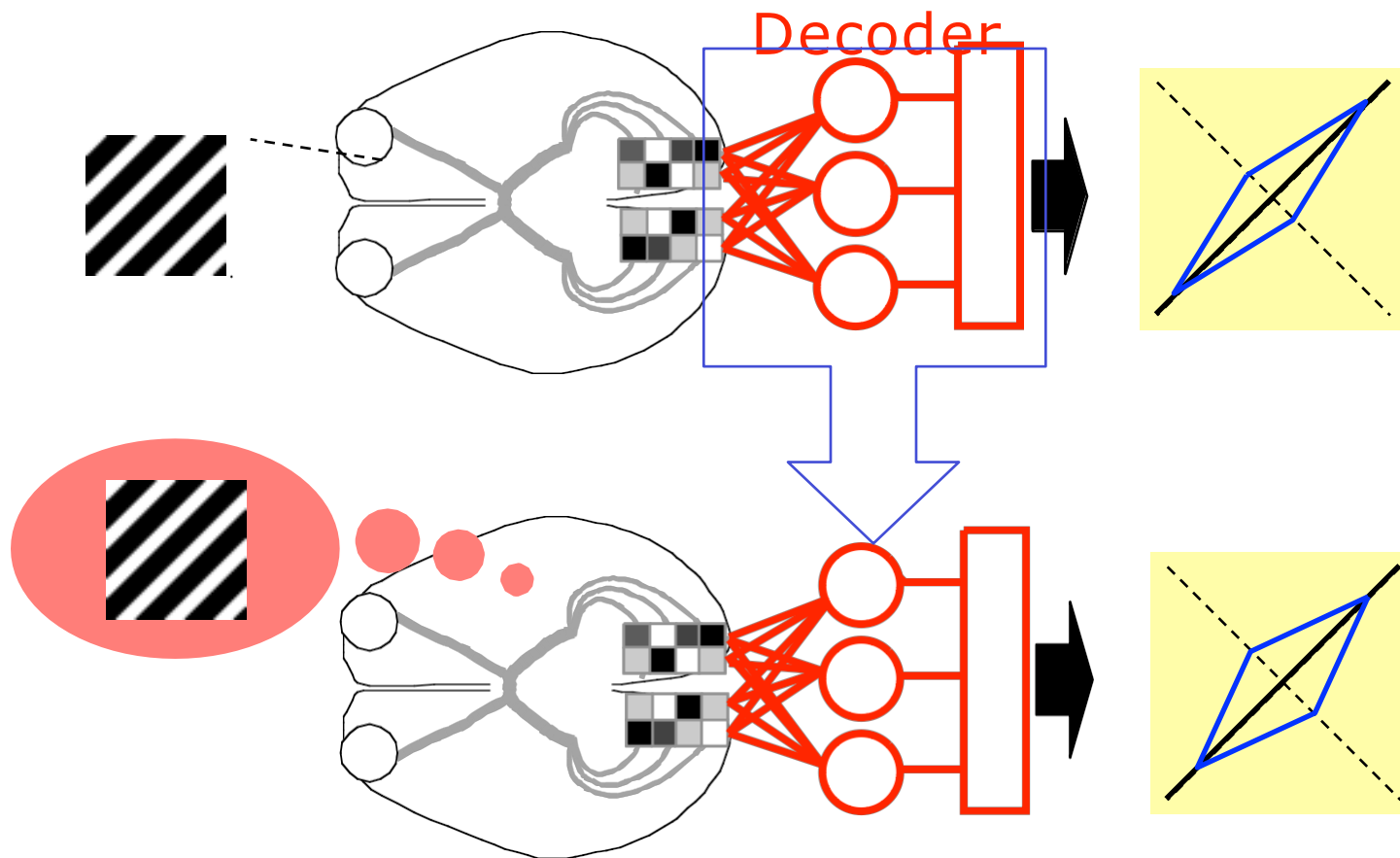
**Orientation
Detectors**



Voxels



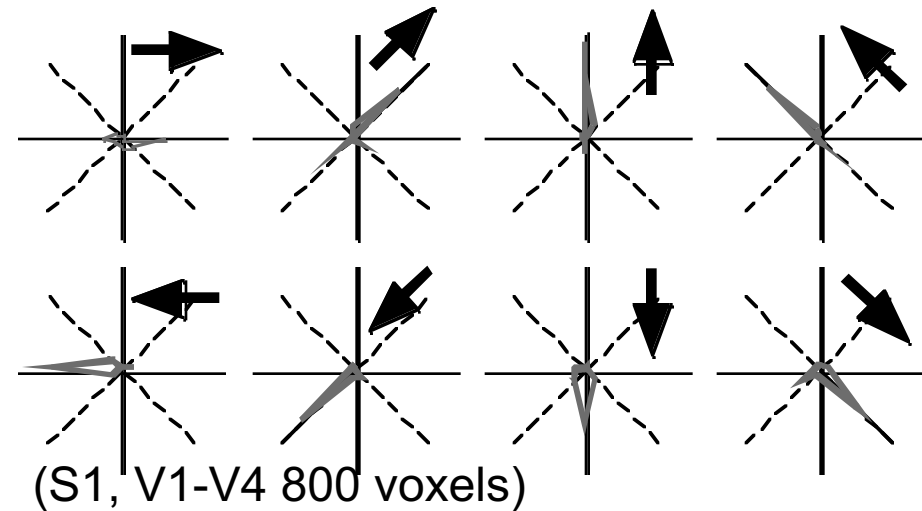
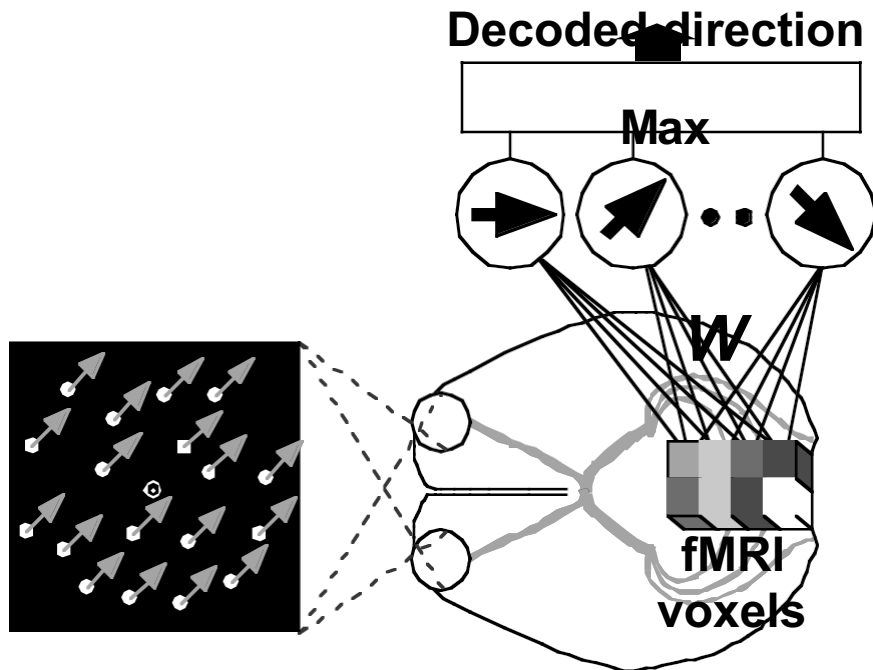
「マインド・リーディング」



Common neural representation
for perception and imagery

運動方向のデコーディング

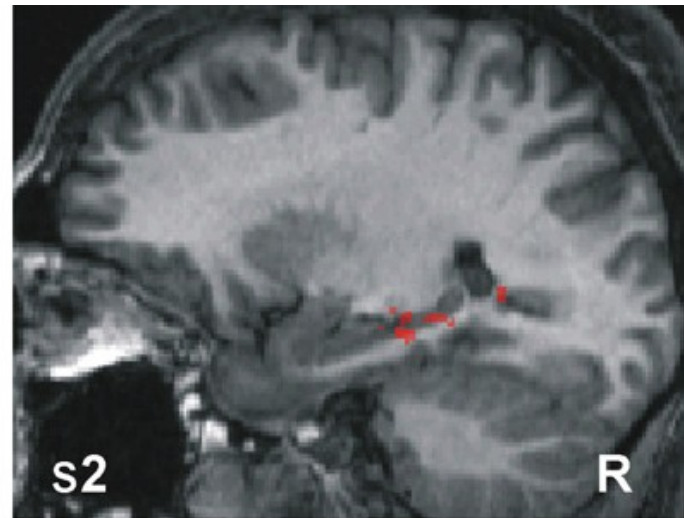
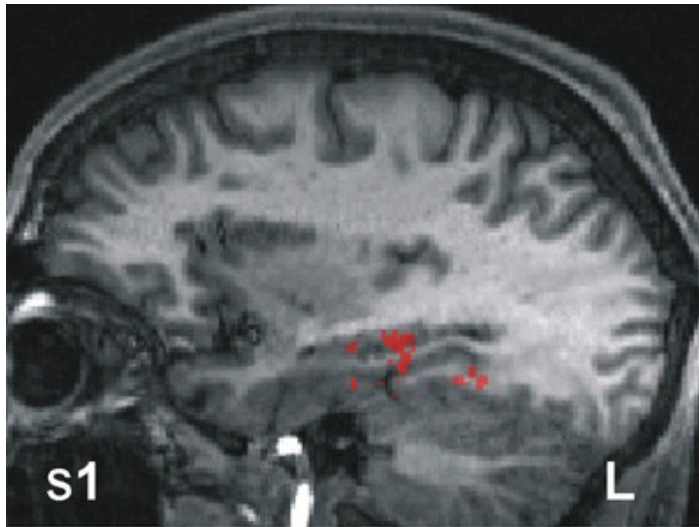
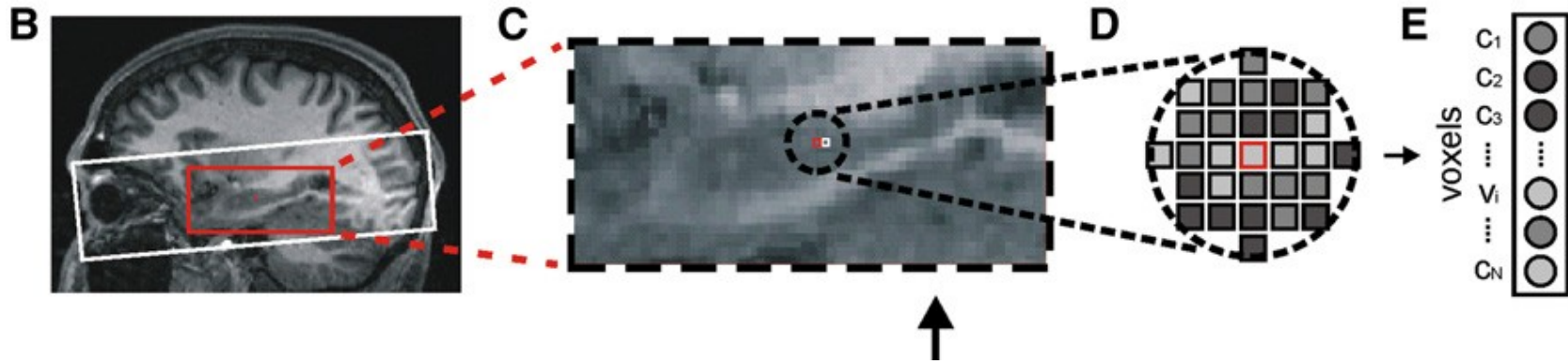
(Kamitani & Tong, *Current Biology* 2006)



*

*

海馬からの記憶内容のデコーディング



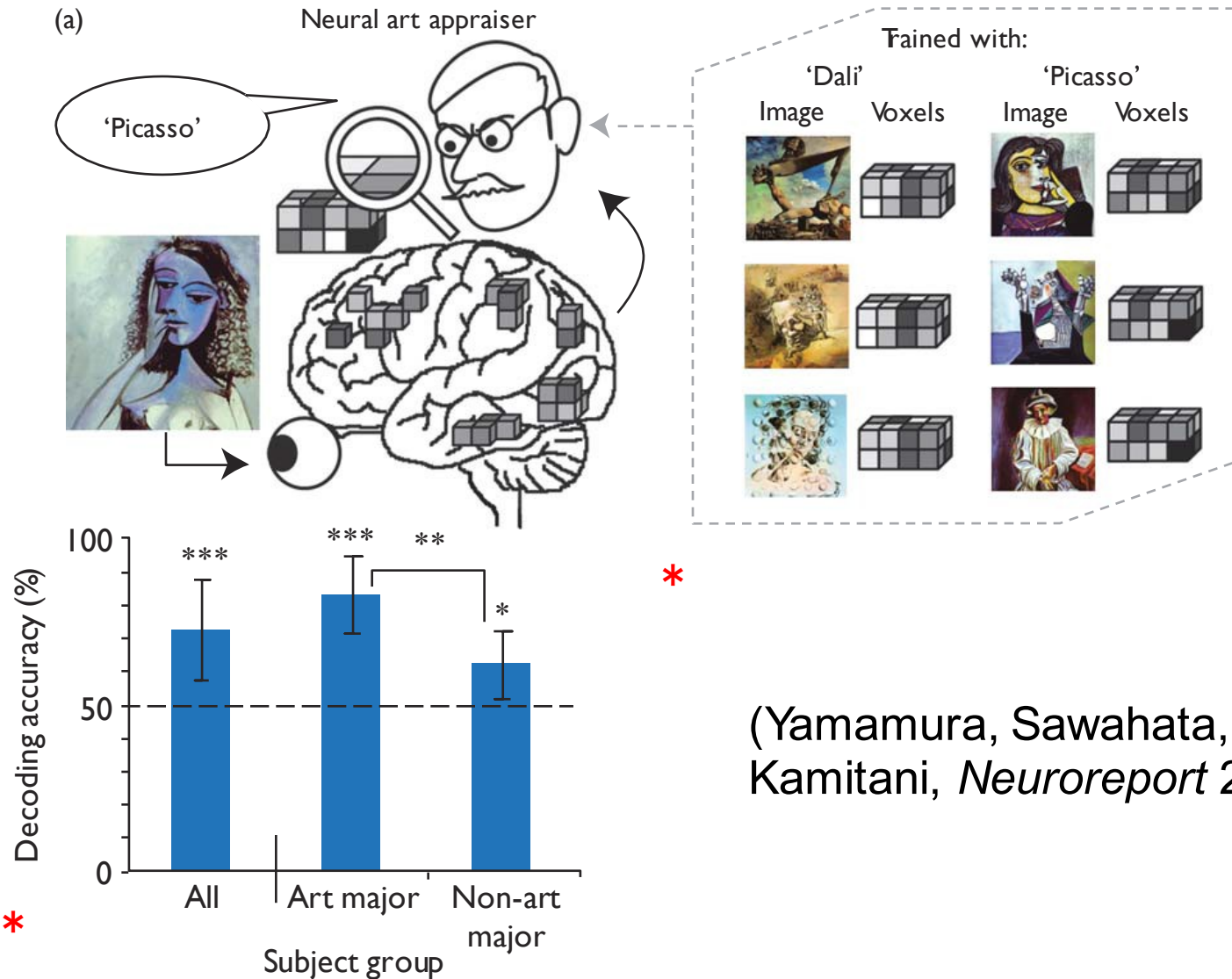
(Hassabis et al. *Curr Biol* 2009)

Hassabis et al. (2009) Decoding Neuronal Ensembles in the Human Hippocampus, *Current Biology* 19 (7): 546–554, p. 548 Fig. 2B, C, D, E.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982209007416>

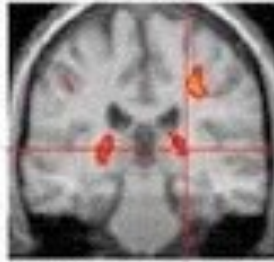
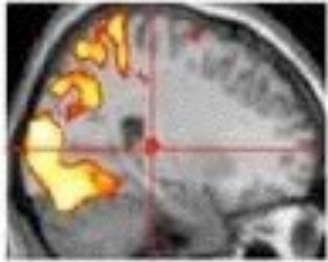
doi:10.1016/j.cub.2009.02.033 CC BY 3.0

腦美術鑑定：Dali or Picasso?

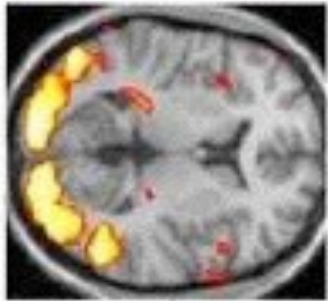


機能マッピングからデコーディングへ

脳機能マッピング



Task A - Task B

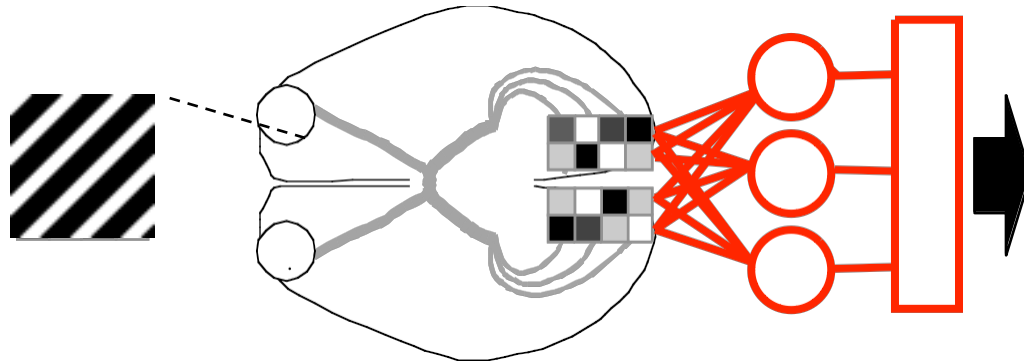


- ボクセル (画素) ごとの解析
- 統計的仮説検定 (p値) で評価
- ピンポン球程度の大きさの脳領域がどのような種類の機能をもつかを大まかにマッピング

ブレイン・デコーディング

- 多ボクセルパターン
- 1サンプルごとの予測精度で評価
- 画素レベルの細かいパターンから具体的な心の状態を予測

脳-機械ハイブリッド情報処理としての ブレイン・デコーディング



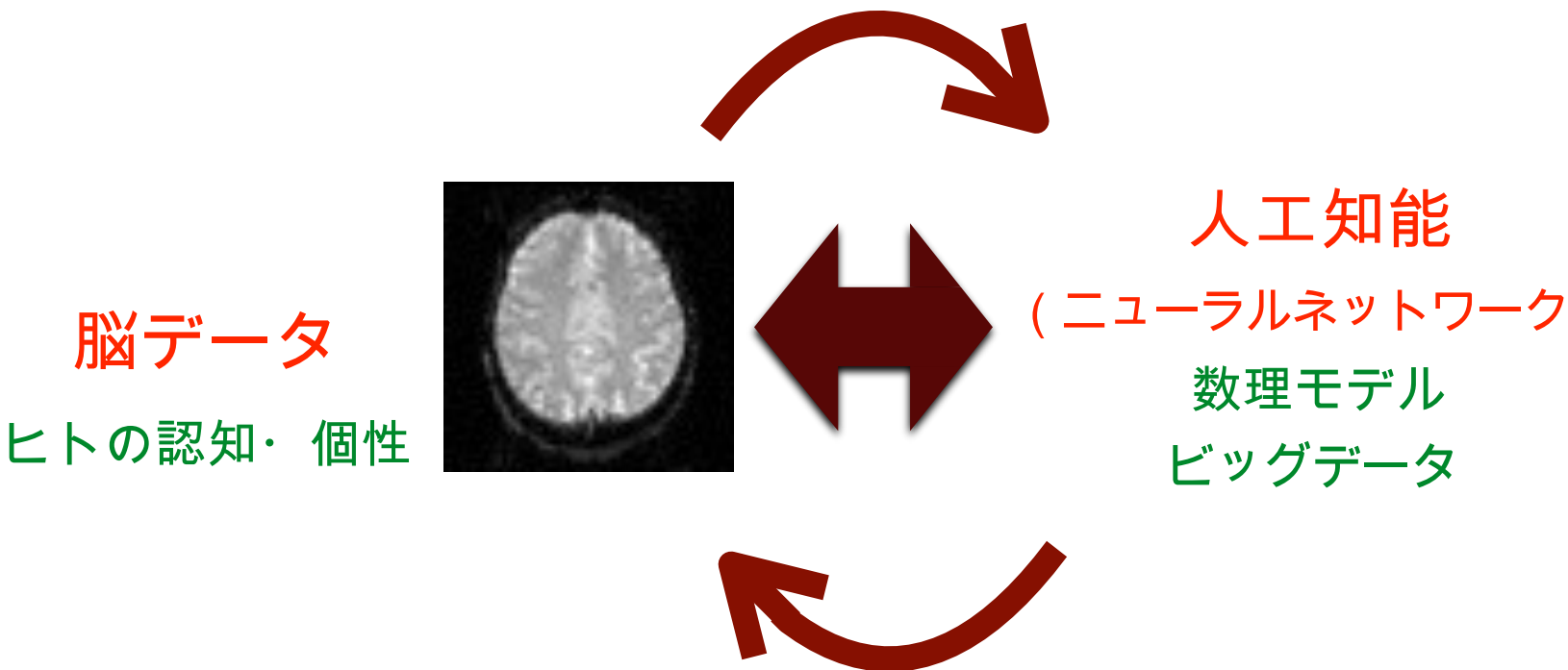
脳による
非線形特徴抽出

機械学習
(人工知能)

脳-機械ハイブリッド情報処理

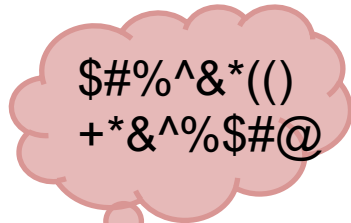
脳-機械融合知能

Brain-machine hybrid intelligence



- ・ 脳データを利用して、人工知能をチューニング・個人化
- ・ 人工知能を利用して、脳をモデル化・ビッグデータと接続

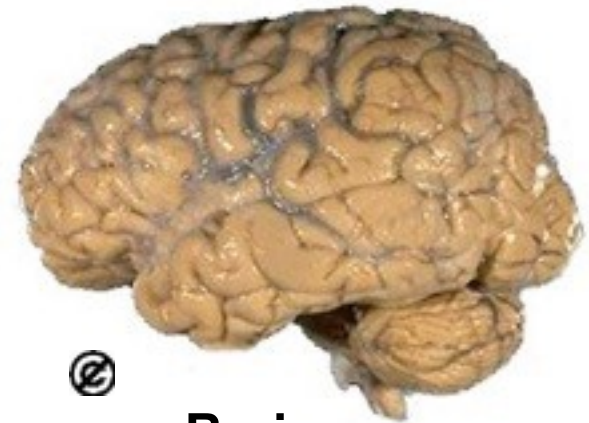
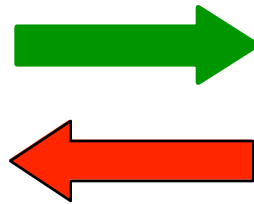
心と脳のマッピング



* ©いらすとや

Mind (behavior)

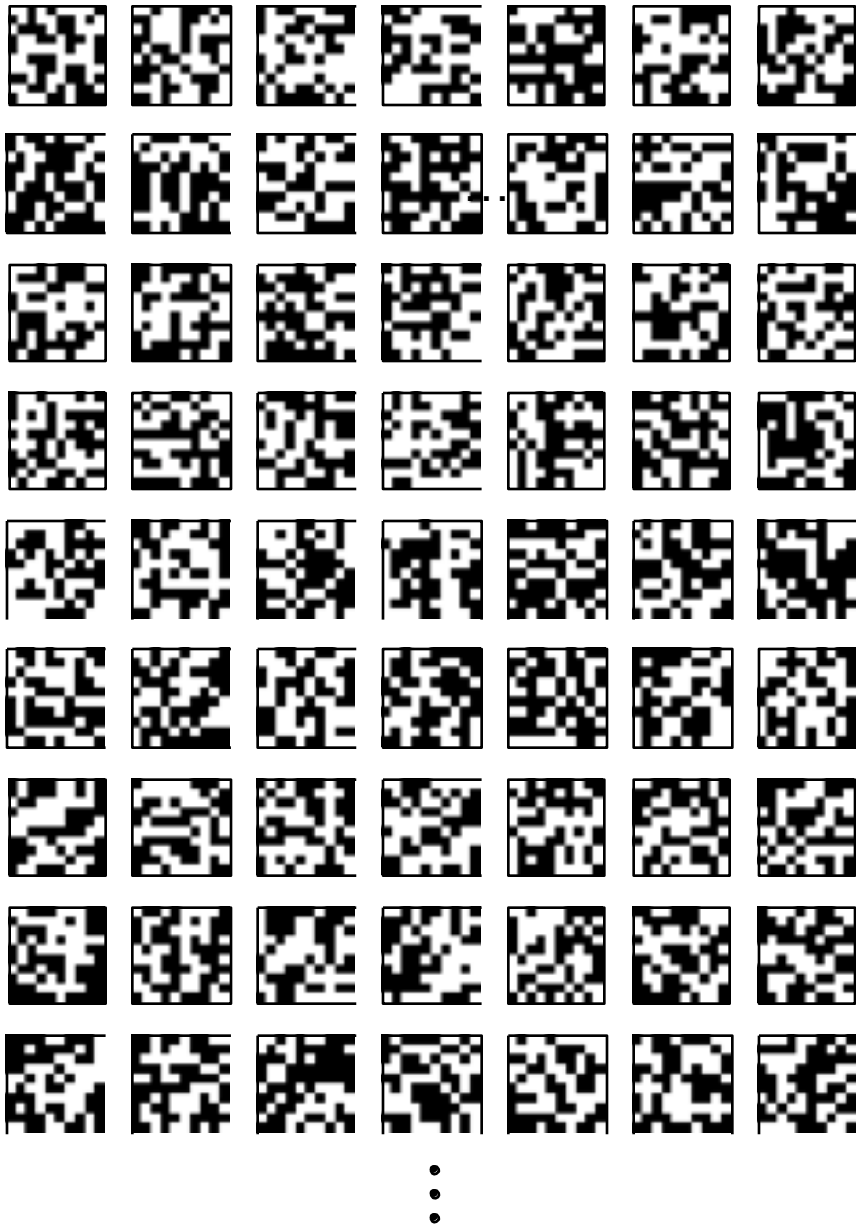
**Many states/
dimensions**



Brain

**Many states/
dimensions**

視覚像再構成：画像としてデコードする



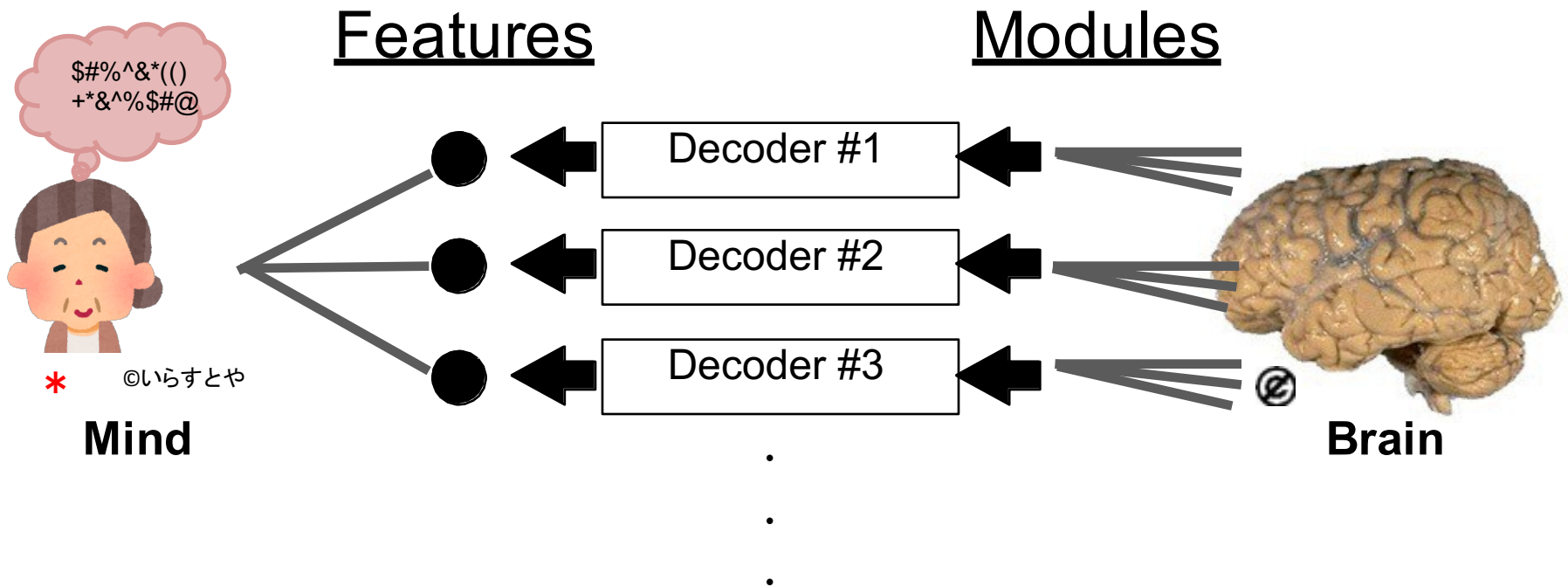
10 x 10ピクセルの 2値
画像 (on/off) の場合

可能な選択肢は
1000000000000000 ... 画像
0が30個



すべての画像に対応する脳活動
パターンを計測するのは現実的に
不可能!

モジュラー・デコーディング

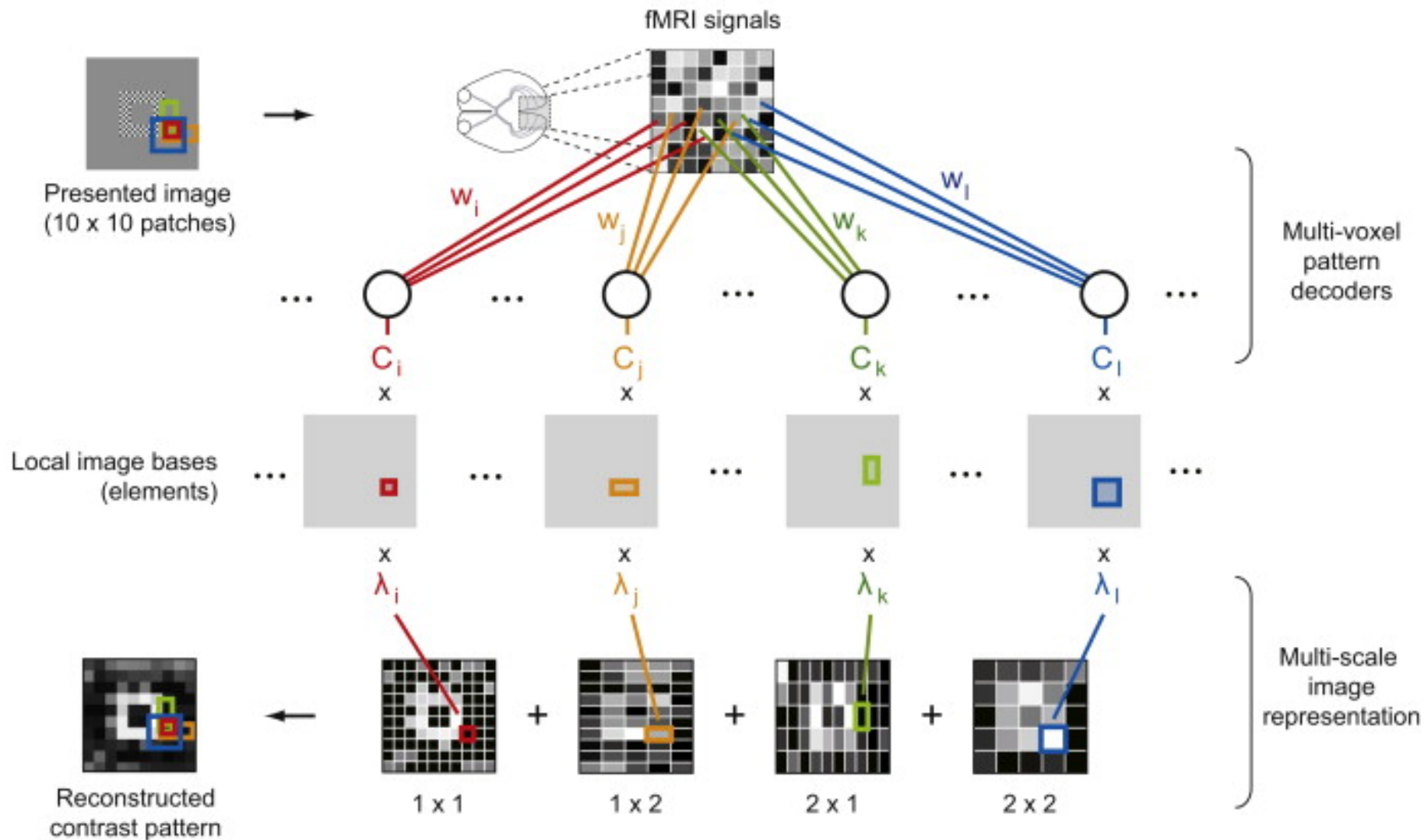


(Miyawaki, Uchida, Yamashita, Sato, Morito, Tanabe, Sadato, and Kamitani, *Neuron* 2008)

視覚像再構成の方法

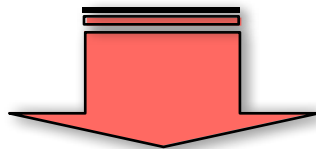
*

A



デコーダのトレーニングとテスト

約400のランダム画像 (約 1 時間の脳計)



トレーニングには用いていない画像
(ランダム画像、幾何学図形、アルファベット)



*

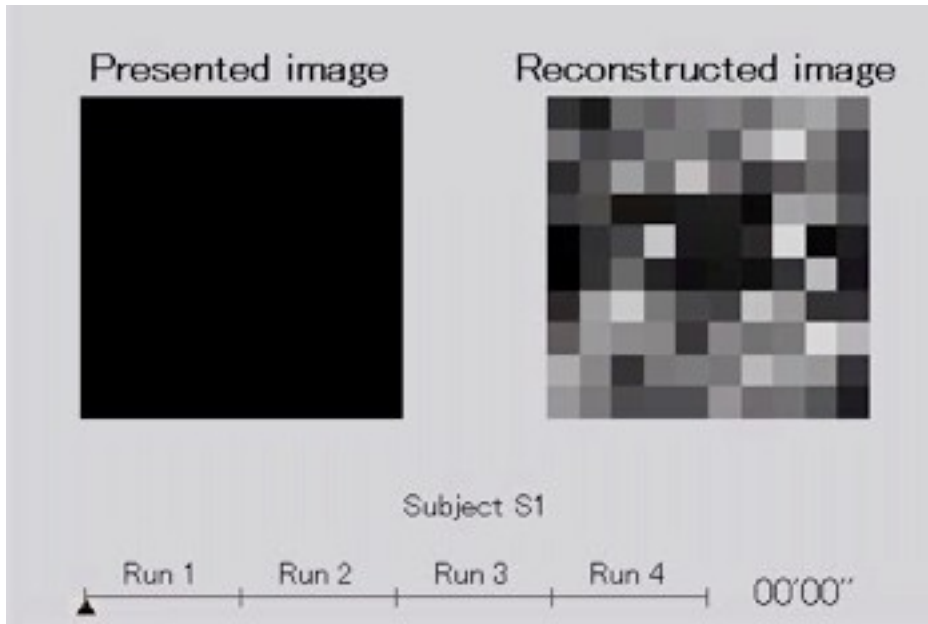
トレーニング

テスト

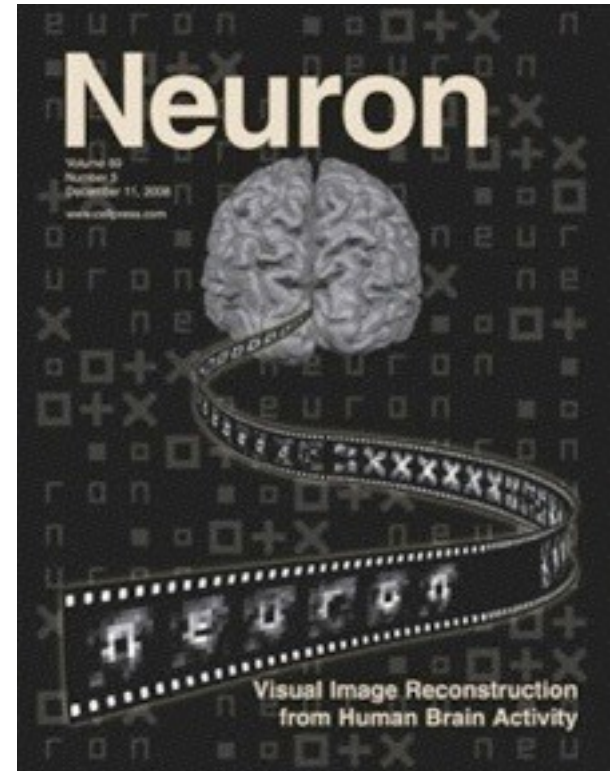
再構成結果



*

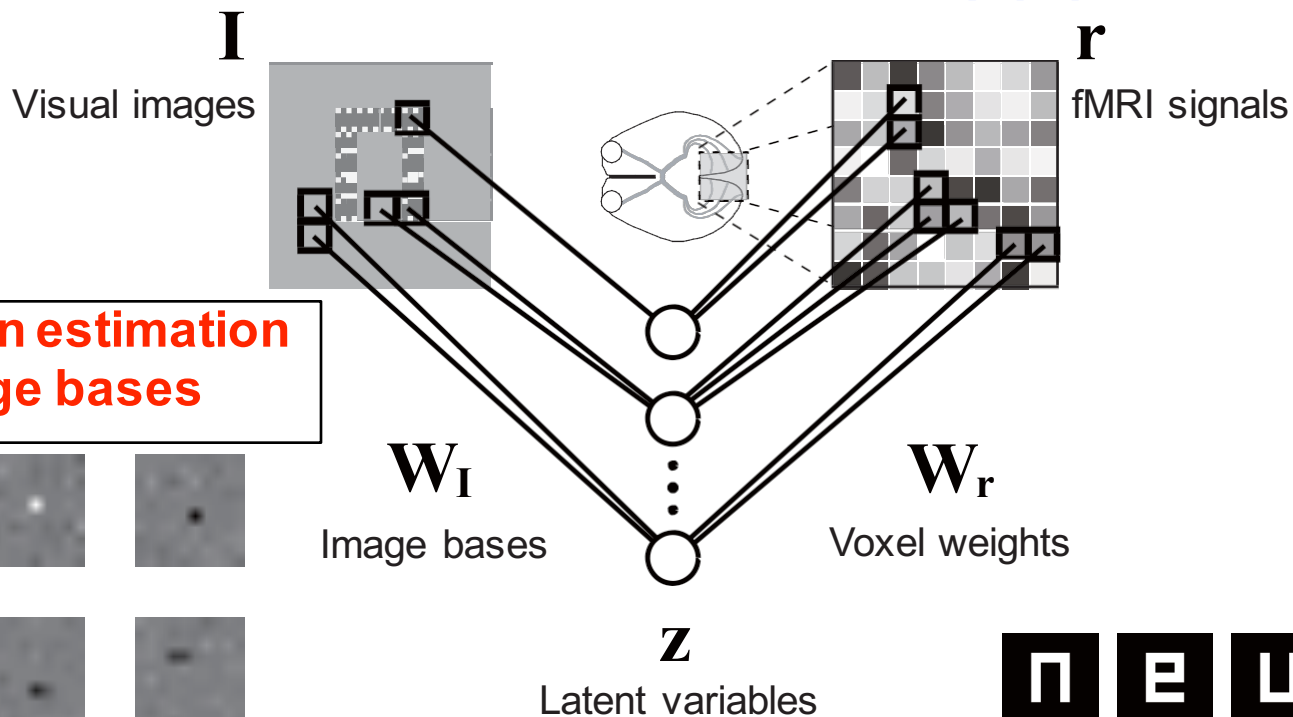


*

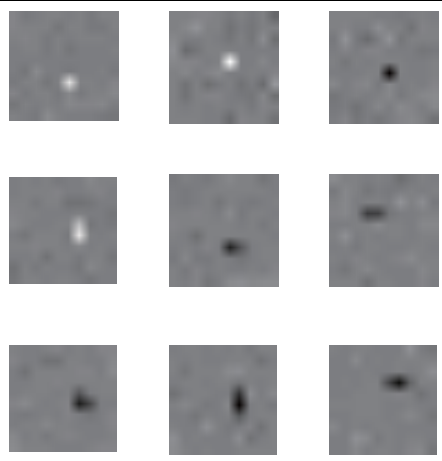


*

画像基底の自動抽出とエンコード・デコードモデルの導出



Data-driven estimation of image bases



Encode model $P(\mathbf{r}|\mathbf{I})$
 Decode model $P(\mathbf{I}|\mathbf{r})$

*

Fujiwara et al. (2013) Modular Encoding and Decoding Models Derived from Bayesian Canonical Correlation Analysis, Neural Computation 25 (4): 979-1005, Fig. 1A.
http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/NECO_a_00423#.Vsq_VICOVM
 doi:10.1162/NECO_a_00423

ビデオデータベースを用いた 動画マッチング

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

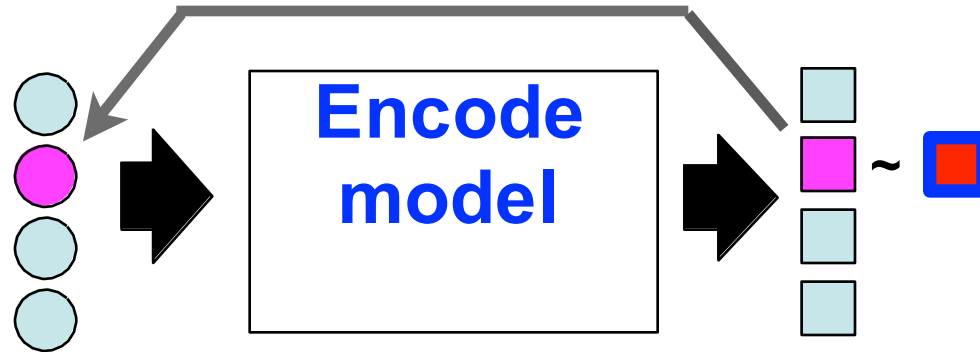
人の顔や風景などの写真

Nishimoto et al. (2011) Reconstructing Visual Experiences from
Brain Activity Evoked by Natural Movies, *Current Biology* 21 (19):
1641–1646, p. 1644 Fig. 4A, B, C.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982211009377>

(doi:10.1016/j.cub.2011.08.031)

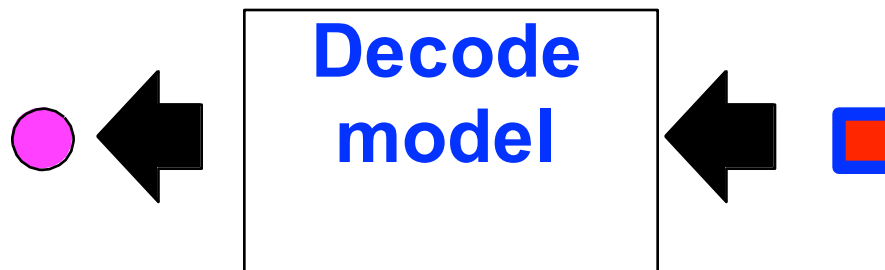
Encode and decode models



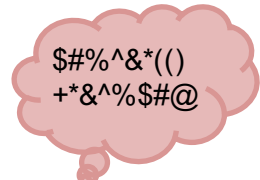
(Kay et al. Nature 2008;
Mitchell et al. Science 2008;
Thiron et al. Neuroimage 2006)



Brain



(Miyawaki et al. Neuron 2008)



* @いらすとや

Mind

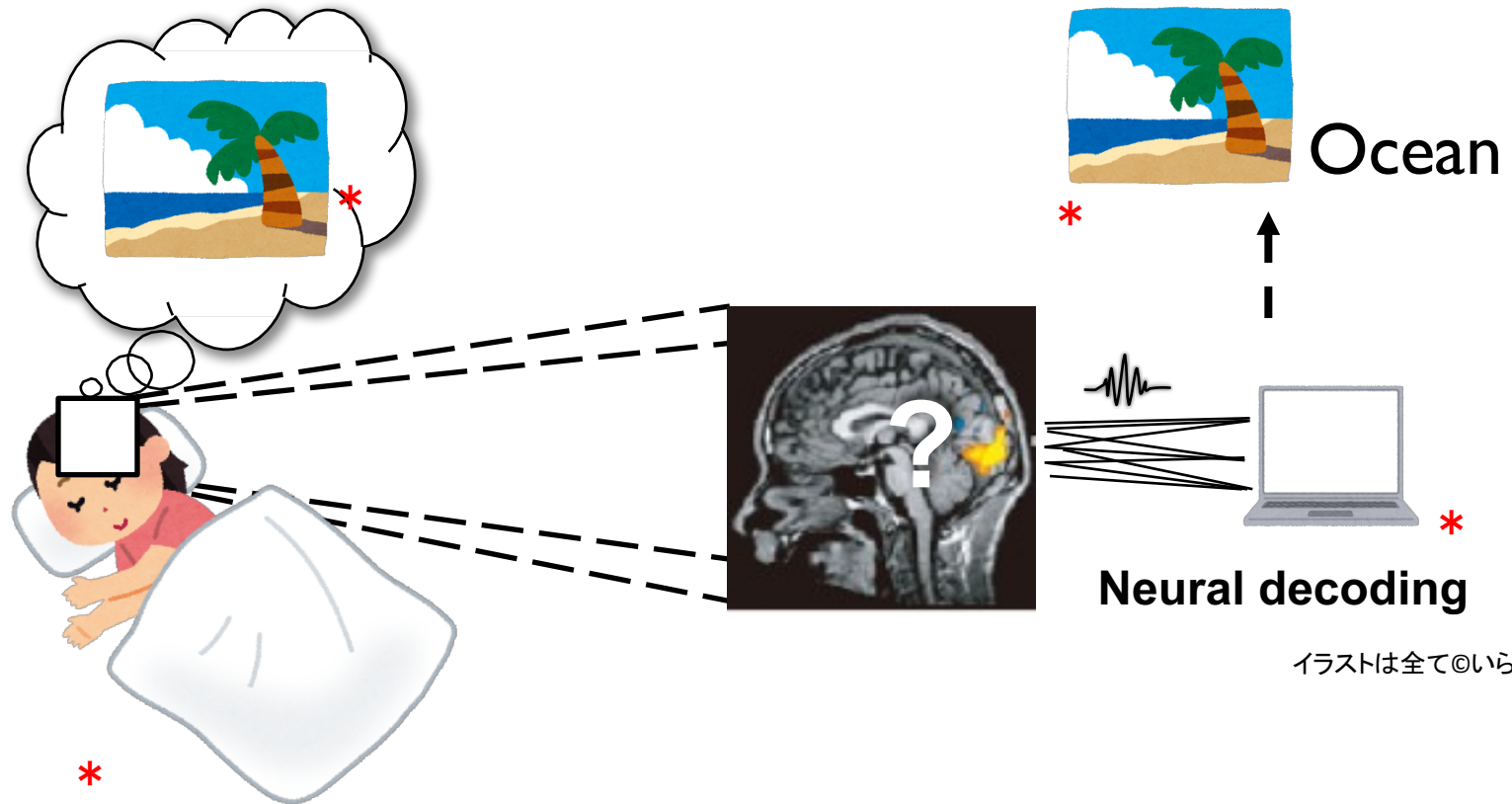
著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

テレビ画面のキャプチャ
「おはよう朝日です」(放送日不明)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

The Sunのキャプチャ画像
「DREAMY scientists say they will come up with new
technology which shows what is on our minds when
we're ASLEEP.」(August 23, 2009)

夢の視覚的な内容をデコードできるか？



イラストは全て©いらすとや

(Horikawa, Miyawaki, Tamaki, Kamitani, *Science* 2013)