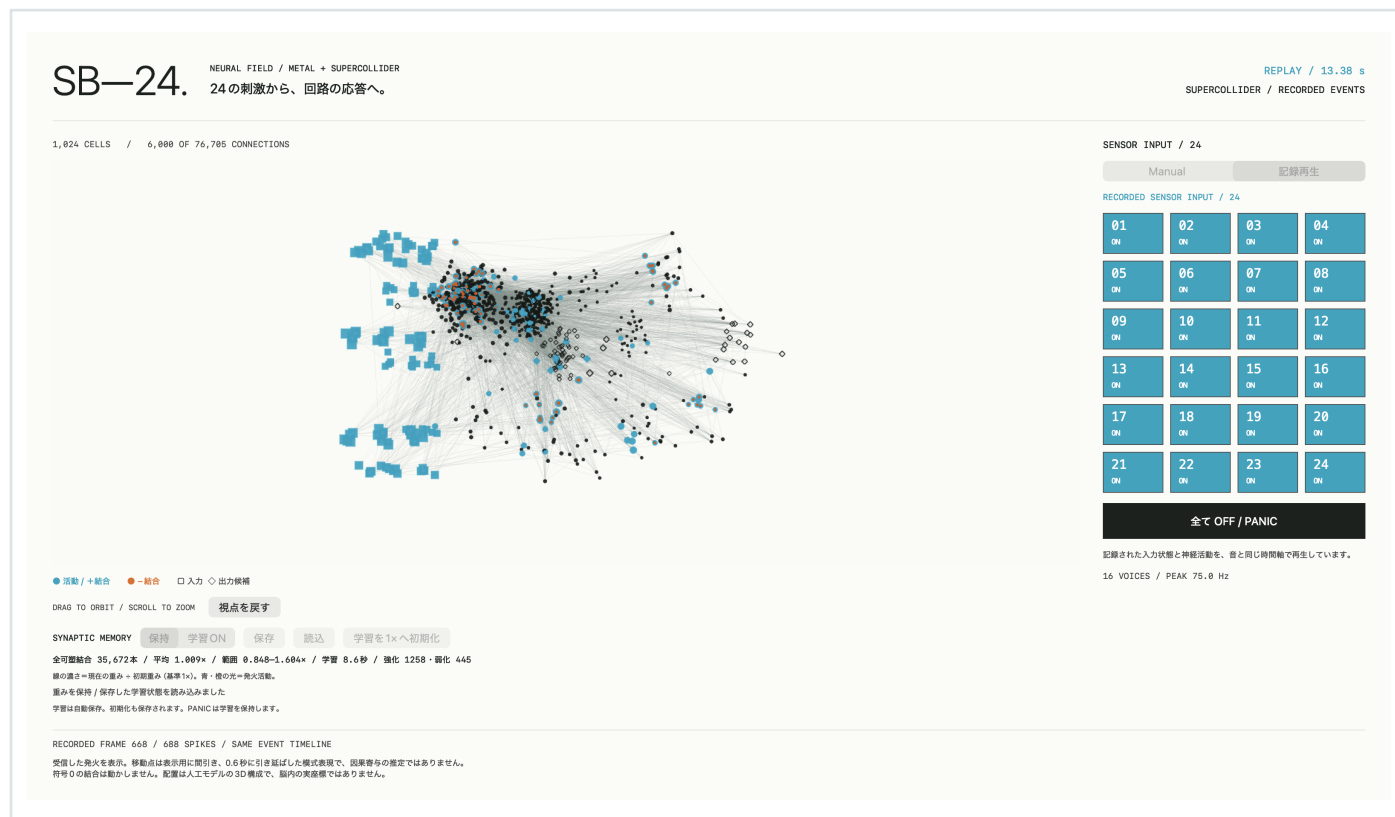


入力の履歴が、音の回路を変える。

24個のON/OFF入力から、人工神経回路の発火・可塑性・合成音・3D表示へ。



1,024

人工ニューロン

76,705

有向接続

24 / 16

二値入力 / 合成音の声

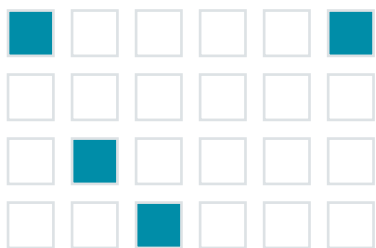
別の32秒実行試験の記録をAppKit + Metalで再描画 (seq 668 / 学習累計8.56秒)。
6ページの30秒学習比較とは別の試験。3D配置は設計した抽象配置。

MaleCNSの配線統計を参照した人工個体。実際のハ工の脳・記憶・行動を復元したものではない。

感覚入力を、共有された回路へ。

スイッチが音源を直接鳴らすのではなく、回路内部で生じた発火が音を制御する。

24個の二値入力

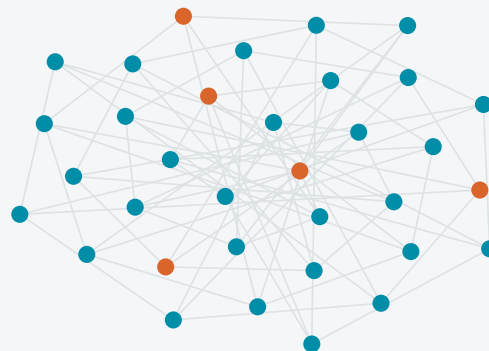


ON / OFFを122個の
入力ニューロンへ分配。
実機と画面操作で同じ形式。



SB-001

1,024ニューロン / 76,705接続



LIF発火 + 可塑性による倍率

SuperCollider / ステレオ

非入力902ニューロンを16群へ。
FM・粒・共鳴・加算合成の4方式。
20 msごとの群活動で制御する。



Apple Metal / 3D

全1,024点と代表6,000接続を描画。
計算済みの発火を可視化する。
伝達の移動表示は説明用の拡大時間。

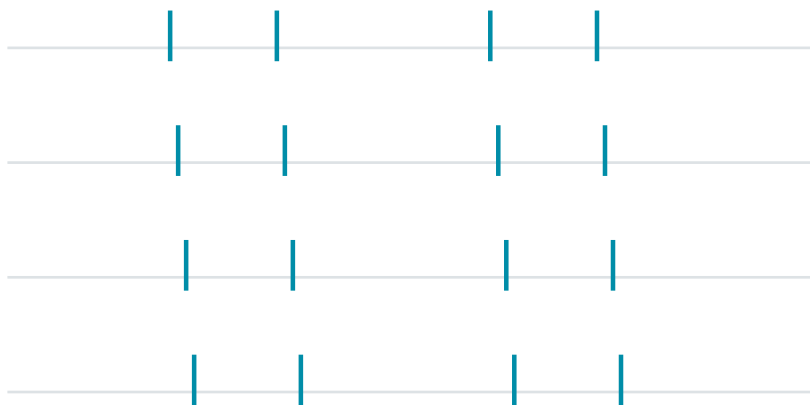


計算・音・映像は別プロセス。同じ神経データを共有し、入力の変化に応答する。
上の回路図は構成を伝える模式図。アプリ内の3D座標も実測の解剖座標ではない。

「いま光ること」と「学習すること」は違う。

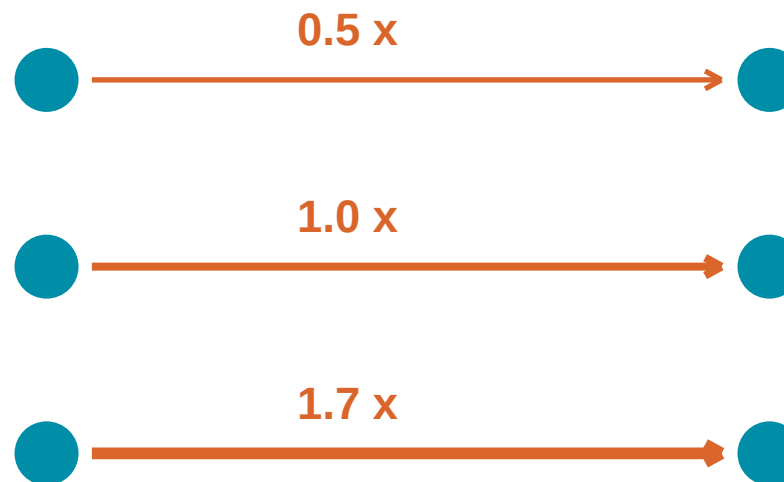
発火は短い出来事。可塑性は、接続の強さを変えて次の応答へ持ち越す仕組み。

発火 / いまの神経状態



模式図: 発火時刻の列

重み / 持ち越す接続の倍率



実効係数 = 固定の基礎係数 × 学習倍率

接続の有無・元重み・符号は保持する。

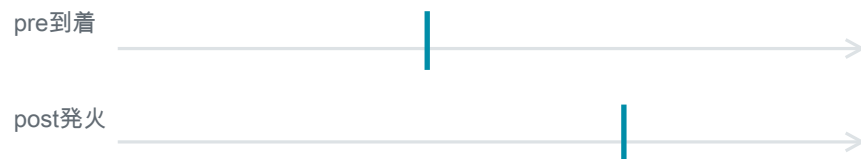
OFFやPANICで活動が止まっても、学習した倍率は保持する。

同じ刺激への応答を比較するときは、神経状態をそろえて、学習の有無を分けて測る。

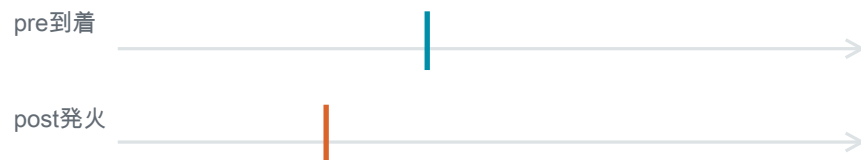
到着の順序で、接続を少しずつ変える。

報酬や正解ラベルを使わず、2つの発火の時間差で局所的に更新する人工ルール。

到着 → 発火 : 増強



発火 → 到着 : 弱化

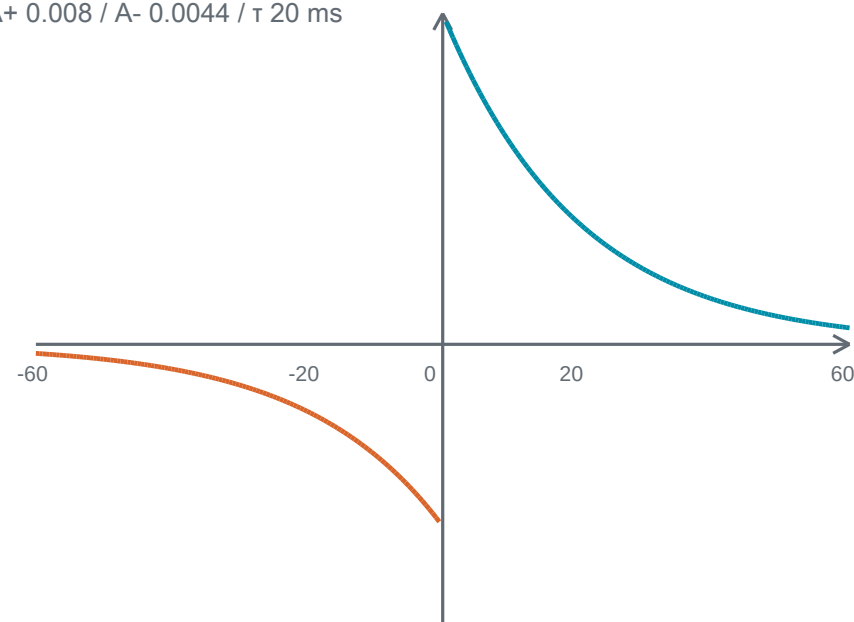


preの基準は細胞体の発火から2 ms後の到着。

同じ刻みで到着と発火が起きた、そのペアの寄与は0。

模式図: 倍率1での1ペアの変化

$A+ 0.008 / A- 0.0044 / \tau 20 \text{ ms}$



$\Delta t = \text{post発火} - \text{pre到着} [\text{ms}]$

$A+ > A-$ のため、順序によらない増強の偏りもある。

参考 [B] Bi & Poo (1998)。ラット海馬の培養細胞の結果を参考に、SB24用に単純化。

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-24-10464.1998>

強くなり続けられないための、3つの仕組み。

全て工学的に設定した値。実際のハ工の学習速度や恒常性を計測したものではない。

01 / BOUND

0.25 - 2 x

上下限の近くでは変化を弱める。
範囲を制限し、符号と接続は保持。

02 / HOMEOSTASIS

> 60 Hz

1秒の平滑化頻度が基準を超えると
超過率に応じて0.02/秒の減衰。

03 / RELAXATION

120 s

倍率を基準の1へゆっくり戻す
緩和の時定数。学習中のみ進む。

学習する接続を限定する

正の発信元から、入力以外の標的へ向かう35,672接続が対象。

負の符号、不明な符号、入力への接続は学習で変更しない。

元の配線と、標的ごとの正規化の分母を固定して比較する。

STDPの更新後、過活動の抑制と基準への
緩和を順に適用。緩和は弱い結合を基準へ
戻す方向にも働く。

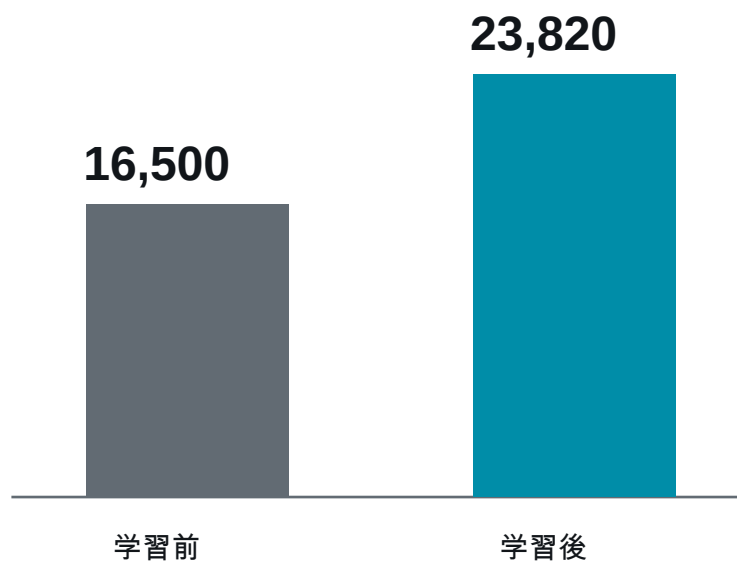
参考 [T] Turrigiano et al. (1998)。培養細胞の調整は時間一日スケール。ここでは操作可能な速度へ設計。

<https://doi.org/10.1038/36103>

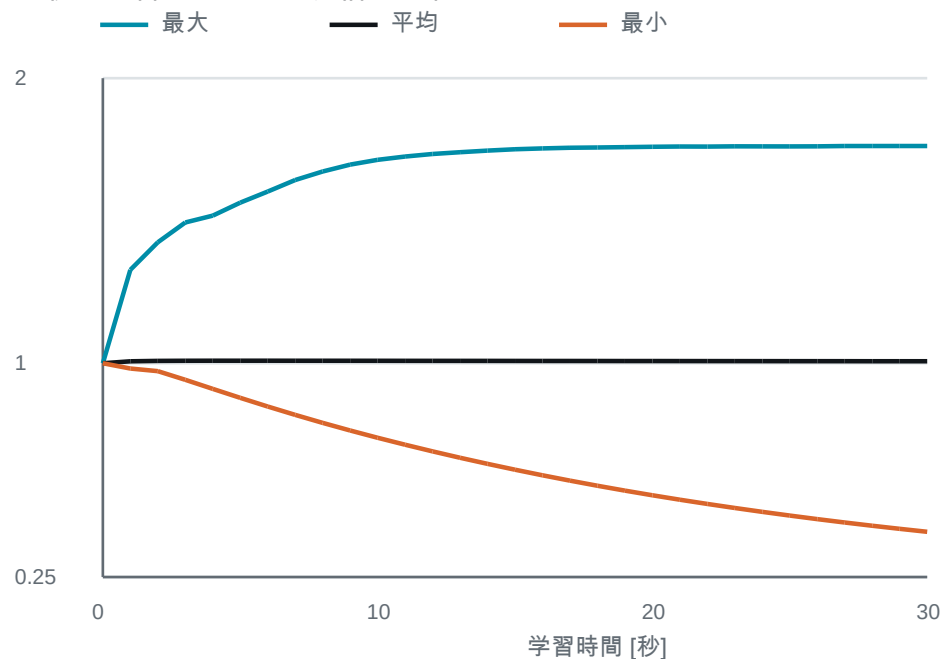
同じ刺激を、学習の前後で比べる。

30秒の全24入力ONで学習し、神経状態をリセットして同じ3秒入力を測定。

同じ3秒の非入力ニューロン発火数



30秒の学習中に変わる、倍率の範囲



強化 1,271 / 弱化 657 接続

判定: $>1.01 \times$ / $<0.99 \times$ 。上下限に達した接続は0%。

最小 0.4087 / 最大 1.7621 x

学習対象35,672接続の平均 1.0070 x

両probeは全24入力ON、学習停止、神経状態をリセット。回路・刺激・音源条件をそろえた2条件比較。

同じ初期条件の音声は再生成でPCM完全一致。学習後のPCMは変化した (スピーカー出力の録音ではない)。

反応の変化を示す実測。特定の順序の記憶、課題の達成、音楽的な改善を示す結果ではない。

止める。比べる。保存して、再び鳴らす。

活動の停止、学習の停止、記憶の初期化を分ける。

起動

live/launch.command

通常は学習ON。保存があれば読込。
15秒ごとと終了時に自動保存する。

学習をPAUSE

倍率を固定

画面の「保持」で倍率を固定。音と活動は続く。
「再開」は新しい発火履歴で学習する。

全OFF / PANIC

神経状態を停止・リセット

入力・神経状態を消して音を止める。
学習済みの倍率は保持する。

記憶を保存 / 読込

重み倍率のJSON

「保存 / 読込」で倍率と学習時間を移す。
「学習を1×へ初期化」で基準へ戻す。

保存先: live/state/synapses.json

保存内容は倍率と学習時間。電位・入力・神経時刻・学習ON/OFFは含めない。モデルや設定が異なるファイルは読込を拒否する。

この実験で示したこと、残ること。

配線の出典、発火モデル、学習ルール、音と映像の変換を区別して扱う。

示したこと

配線統計から作った人工回路が24入力に応答し、その発火が音と映像を動かす。局所的な人工可塑性で重み倍率を更新し、同じ刺激への応答の変化を測定する。

示していないこと

ハ工の脳全体・実際の記憶・意識・学習行動の再現。報酬課題の達成や音楽的な改善。実センサー配線、聴感、物理入出力の遅延は別途の実機確認が必要。

[M] MaleCNS v1.0 / FlyEM・ HHMI Janeliaほか

配線データと出典・ ライセンス。SB-001はその一部から統計的に派生させた人工回路。

<https://male-cns.janelia.org/download/>

[B] Bi & Poo, J. Neurosci. 18, 10464-10472 (1998)

ラット海馬の培養細胞における発火順序と可塑性。SB24のハ工特異的な再現性を示す研究ではない。

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-24-10464.1998>

[T] Turrigiano et al., Nature 391, 892-896 (1998)

大脳皮質の培養細胞で活動に応じたシナプス強度の調整を報告。SB24の速い安定化項は工学的な設計。

<https://doi.org/10.1038/36103>

[G] Google Research / Male fruit fly brain map (2026)

制作の出発点となったMaleCNS紹介記事。

<https://blog.google/innovation-and-ai/technology/research/male-fruit-fly-brain-map/>

Data: FlyEM / HHMI Janelia · University of Cambridge · MRC LMB · Google Research / CC BY 4.0