

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月22日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500294

研究課題名（和文）時間次元を用いた匂い情報表現：濃度不変性と分類の時間－精度トレードオフ

研究課題名（英文）Odor Information Representation Using the Temporal Dimension: Concentration-Invariance and Speed-Accuracy Trade-off.

研究代表者

牧野 悌也（MAKINO YOSHINARI）

東北学院大学・教養学部情報科学科・准教授

研究者番号：90250844

研究成果の概要（和文）：匂いは動物の様々な行動をガイドする。実世界における柔軟な匂い情報処理を実現するには、濃度に依存しない匂いの質の評価と、様々な匂い間での質の類似性を適切に評価する必要がある。本研究では、これらを可能とする、時間次元を用いた匂い情報表現の計算論的アルゴリズムを提案し、神経ネットワークが提案アルゴリズムを実行できることをモデルシミュレーションにより確認した。

研究成果の概要（英文）：Animals have an excellent ability to perceive various odors robustly, even when the environment is dynamically and unpredictably changing. Here, we proposed a computational model in which the concentration-invariant odor information is represented by the spatiotemporal activity of network. The represented odor information is easily evaluated and stored by another network model for the higher olfactory center. In our model, transforming the input spatial pattern into the invariant spatiotemporal order is essential for representing the odor information and output patterns of the proposed networks are consistent with those of the biological ones.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：脳・神経、脳型情報処理、情報表現、時間コーディング

1. 研究開始当初の背景

一次嗅覚ネットワーク（脊椎動物の嗅球、olfactory bulb；昆虫の触角葉、antennal lobe等）の解剖学的特徴は種によらず共通で（図1）、その時間的活動パターンが匂い情報表現において重要である。匂い情報の入出力関係に関する一次嗅覚ネットワークの生理学的知見は、次のようにまとめられる。

（1）匂いは糸球体活動の空間パターンとして入力される。各糸球体はそれぞれ匂い特徴を表現する特徴次元と考えられる。糸球体の活動強度は匂い濃度の対数に比例してほぼ線形に増加する。異なる匂いには異なる空間パターンを示す。図2a, bはこれらを模式的に示す。

（2）出力神経は神経集団として匂い特異的

な時間パターンで応答する。この時間パターンは、匂いの濃度変化に対しロバストで、100~1000倍の濃度範囲で変化しない。

嗅覚一次中枢では、濃度に依存した空間パターン入力を、濃度不変な時空間活動パターンに変換することで、匂い情報を表現していると考えられる。行動学的には、匂い情報処理に要する時間と識別精度の間にトレードオフの関係 (Speed-Accuracy-Tradeoff) があることが知られており、脳内における情報表現が時間的に coarse-to-fine な様式を持つことを示唆する。

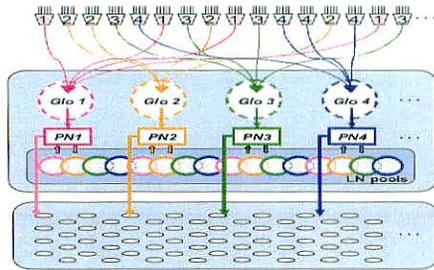


図1 嗅覚システムの構造

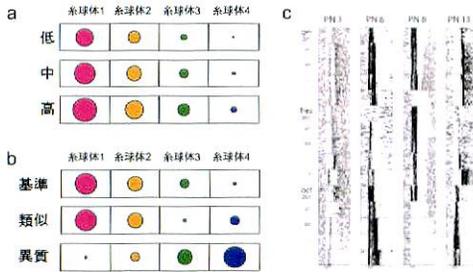


図2 嗅覚一次中枢の入出力パターン。

cは Stopfer et al. (2003) *Neuron*, 39, 911-1004より

2. 研究の目的

本研究では、これらの生理学的知見を説明する時間次元を用いた計算論的情報表現アルゴリズムとして、図3の手法を提案する。入力表現において糸球体活動の強度順は濃度変化にロバストある。よって、提案手法では、各糸球体から入力を受ける出力神経を仮定し、抑制性介在神経との相互作用により、糸球体の活動強度順を出力神経の時間的活動順序に変換する。

出力神経活動の時間パターンは濃度不変性を示す。表現可能な匂いの数は活動する糸球体数の順列組み合わせとなる。匂い刺激によりおおむね 10 糸球体が活動とした場合、 3.6×10^6 の匂いが表現できることになり、生物が持つ匂い識別能力を十分説明するといえる。応答の初期においては、匂いの特徴づける主要な性質を、後期においては微細な性質をコードするため、情報表現は時間的に coarse-to-fine な様式となる。

3. 研究の方法

提案する計算論的アルゴリズムの生物学的

妥当性を明らかにするためには、提案アルゴリズムが生物学的にもっともらしい神経モデルとその相互作用により実行可能であること、また、提案する情報表現が高次中枢ネットワークにおける情報処理に有用であることを示す必要がある。よって、研究期間内に以下の3点を実行する。

(1) コンピュータシミュレーションにより、上記の計算論的アルゴリズムが生物学的に妥当な神経ネットワークモデルにより実行可能であることを示す。時間的順序により表現された匂い情報の活動シーケンス全体を評価するための高次中枢ネットワークモデルを構築する。

(2) 高次中枢ネットワークにおける匂い記憶の獲得・想起機構をモデル化し、匂い分類・識別を行う嗅覚システムモデルを構築する。

(3) モデルの生物学的妥当性を検証するため、高次中枢ネットワーク構造がボトムアップ的に自己組織化可能かを確かめる。

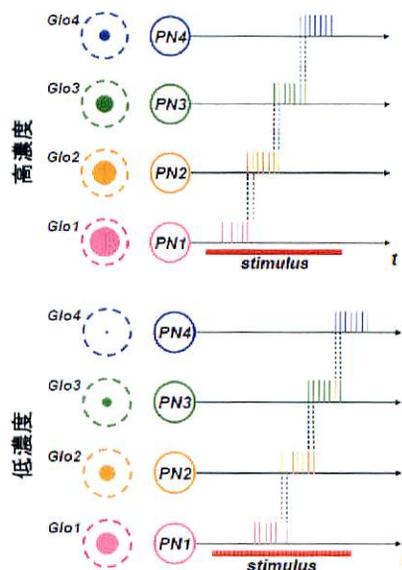


図3 時空間パターンにより匂いを表現する計算論的アルゴリズム

4. 研究成果

(1) 一次嗅覚ネットワークにおける生理学的知見を説明する時間次元を用いた計算論的情報表現アルゴリズムとして「糸球体の活動強度順から出力神経の時間的活動順序への変換」を提案した。コンピュータシミュレーションにより、この計算論的アルゴリズムが、1) 出力神経を、非線形特性をもつ素子でモデル化し入力強度にしたがって応答時間が短くなるように設定し、2) 活性化された出力は糸球体モジュール間抑制を担う介在細胞により他の糸球体モジュールの出力

神経が活性化されるのを一過的に遅らせるようにネットワークを構築し、3) 糸球体モジュール内抑制を担う介在細胞により、出力神経活動のオフセットを適切なタイミングに設定する、ことで実現できることを示した。更に、一次嗅覚モデルで生成された発火順序を評価は、2つの出力神経が特定の順序で発火することを検出する順序検出器を作り、すべての出力神経の組の発火順序を判定できるように高次中枢ネットワークを構築することで実現できることを示した。図4に結果を示す。

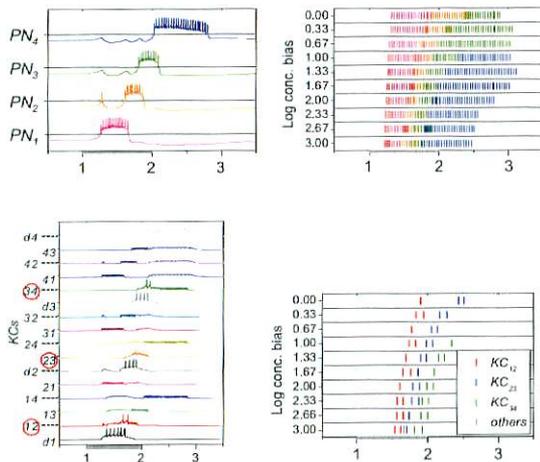


図4 ネットワークモデルによる提案アルゴリズムの実現

(2) 提案した活動の時間順序を評価する高次中枢モデルにおいては、その構造が一次中枢出力神経からの結合と高次中枢内の結合が整然とした組み合わせ構造を持ち、これがどのような自己組織的メカニズムにより創発するかを重点的に検討した。仮定するシナプス結合生成ルールとして、1) プレシナプス機構のみ、2) ポストシナプス機構のみ、3) プレシナプス-ポストシナプス間の協調的機構、を検討した結果、

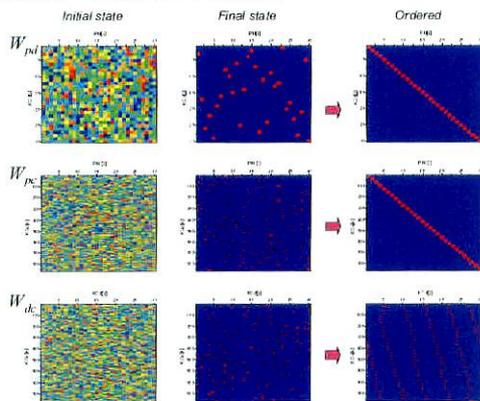


図5 高次中枢自己組織化のシミュレーション結果

時間順序を判定するネットワークの自己組織化には、プレポストの協調的機構が必要不可欠であることを明らかにした。明らかにしたプレシナプス-ポストシナプスの協調的機構は、生理学的に十分妥当なメカニズムであり、提案した時間順序により匂いをコードするネットワークモデルの生物学的妥当性を強く支持する結果である。結果を図5に示す。

(3) 提案してきたモデルでは神経活動の時間順序が、各神経が表現する匂い特徴の重要度に対応している。よって、類似度評価神経を、①記憶した匂いで最初の活動する神経を検出し、②活動順序が一致し続ける限り活性化し続け、③記憶と異なる神経が活動したら活性化を終了する、ようにモデル化した。具体的には、類似性評価神経は NMDA 様の受容体を持つと仮定し、匂い入力が存在すると活動が抑制されるオフ神経と記憶依存の活動の両方が同時に入力された場合のみ、その後の記憶依存活動からの入力が加算されるようにした。これにより、類似性評価神経は現在の匂い入力記憶と一致し続ける限り活動強度が強くなり、類似性に応じた適応的行動を引き起こすことができることを明らかにした。本モデルの応答は、昆虫の記憶中枢の下流に存在する記憶読み出し神経の応答と似ており、これはモデルの生理学的妥当性を支持するものである。図6に結果を示す。

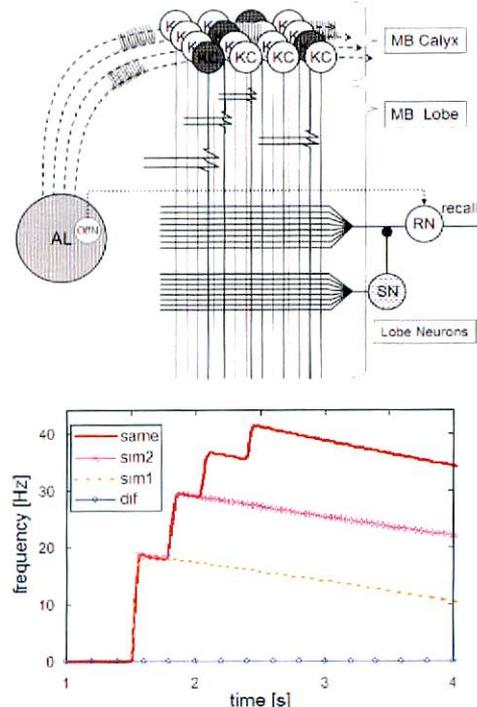


図6 匂いの類似性を評価する記憶読み出し神経モデル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① 牧野 悌也 ふるさとの香り, AROMA RESEARCH, 査読無, Vol.13, 2012, 67
- ② 牧野 悌也, 矢野雅文, 神経活動の時間順序を評価するネットワークモデルの自己組織化, サイバースペースと仮想都市研究会 CSVS2012-18, 査読無, 2012, 81-86,
- ③ 矢野雅文, 富田望, 牧野 悌也, 適応的な歩行運動のシミュレーション, BRAIN and NERVE, 査読有, 62巻, 2011, 1173-1181,
- ④ Matsumoto J, Makino Y, Miura H, Yano M, A computational model of the hippocampus that represents environmental structure and goal location, and guides movement, Biological Cybernetics, 査読有, vol.105, 2011, 139-152, DOI: 10.1007/s00422-011-0454-6
- ⑤ Makino Y, and Yano_M “Investigating the Underlying Intelligence Mechanisms of the Biological Olfactory System,” Advances in Artificial Intelligence, 査読有, 2010, ID 478107
- ⑥ 吉原佑器, 牧野 悌也, 富田望, 矢野雅文, 関節の動きやすさのリアルタイム最適化は大域的最適な腕運動を生成するか?, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 45巻, 2009, 570-579,
- ⑦ 伊藤岳大, 牧野 悌也, 矢野雅文, 時空間表現された匂い情報の記憶と想起の神経モデル, 日本神経回路学会第19回全国大会講演論文集, 査読有, 2009, 68-69,
- ⑧ Makino Y, Yano M, Rules for self-organization of a model olfactory network that evaluates a temporal sequence of neural activity, Neurosci Research, 査読無, vol.65, 2009, S210

〔学会発表〕(計8件)

- ① 牧野 悌也, 矢野雅文 神経活動の時間順序を評価するネットワークモデルの自己組織化, 第10回香りと生体情報研究会 2012.6.8, 宮城 大崎市
- ② 牧野 悌也 時空間的活動パターンを用いた匂い情報表現ネットワークモデル 第9回 香りと生体情報研究会 2012.3.2 東京, 駒場
- ③ 伊藤岳大, 川上進, 牧野 悌也, 矢野雅文, 羽生貴弘 曲率円ベース形態表現のための神経回路網モデル 電子情報通信学会, 第24回多値論理とその応用研究会 2011.1.9 仙台

- ④ 牧野 悌也 嗅覚認知機能を発現する情報表現アルゴリズムの神経回路モデルによる実装 第29回日本シミュレーション学会大会 2010.6.19 米沢
- ⑤ 富田望, 酒井宏忠, 牧野 悌也, 矢野雅文 予測不可能な環境における随意運動適応過程の心理物理実験 移動知シンポジウム 2010.3.3 松島
- ⑥ 牧野 悌也 神経活動の時空間ダイナミクスによる嗅覚情報処理 ブレインウェア研究会 2009.11.30 仙台
- ⑦ 伊藤岳大, 牧野 悌也, 矢野雅文 時空間表現された匂い情報の記憶と想起の神経モデル 日本神経回路学会 2009.9.25 仙台
- ⑧ 牧野 悌也, 矢野雅文 神経活動の時間順序を評価する嗅覚ネットワークモデルの自己組織化ルール 日本神経科学学会大会 2009.9.17 名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧野 悌也 (MAKINO YOSHINARI)
東北学院大学・教養学部情報科学科・
准教授
研究者番号: 90250844

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

矢野 雅文 (YANO MASAFUMI)
東北大学・電気通信研究所・客員教授
研究者番号: 80119635

伊藤 岳大 (ITO TAKEHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・修士学生