



# 鼻腔外からの電気刺激による擬似的な匂い方向提示に関する基礎的検討

松井 彩里<sup>1)</sup>, 青山 一真<sup>2)</sup>, 葛岡 英明<sup>1)</sup>, 鳴海 拓志<sup>1)</sup>

Ayari Matsui, Kazuma Aoyama, Hideaki Kuzuoka, Takuji Narumi

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {matsui, kuzuoka, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, aoyama@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 嗅覚ディスプレイの中でも匂いの方向提示に着目した研究は少ない。匂い源の左右方向を識別するためには鼻腔内の三叉神経枝への刺激分布が有効である。本研究では、鼻梁と頸部背面の電極への電気刺激が三叉神経刺激のような鼻腔内化学感覚を惹起することを利用し、匂い提示と同時に電気刺激を行うことによる擬似的な匂い方向提示を試みた。実験の結果、より効果的な条件の精査は求められるものの、匂い方向提示の可能性が示唆された。

**キーワード:** 嗅覚, 電気刺激, 三叉神経, クロスモーダル

## 1. はじめに

嗅覚は感情や記憶、行動に働きかける特性を持つため、これらを活用すべく様々な嗅覚提示インタフェースが提案されている。その一つとして匂いによるナビゲーションなども提案されているが [1], そのために必要な嗅覚の空間情報提示に関する研究例はごく少ない。僅かな例として Yamada らによるウェアラブル嗅覚ディスプレイがあり、位置や体の向きに応じて提示する匂い濃度を変えることでユーザは仮想的な匂い源の位置を特定できることが報告されている [2]。しかしこの手法は頭部を動かして匂い濃度のサンプリングを行うため時間を要し、またそもそも匂い濃度の変化の検出は難しいため [3], その空間分解能は低い。効率的で高い空間分解能の嗅覚空間情報提示を目指すには、例えばユーザの左右から強度の異なる匂いを提示し、頭部を動かさずとも左右の鼻孔に入る匂い物質の濃度差からある程度方向を識別可能にする手法が考えられる。しかし人間には左右の鼻孔に入る匂い物質の濃度差から匂いの左右を識別する能力は無いことが知られている [4, 5]。

一方で、メントールのスツとした感覚など鼻腔内三叉神経によって惹起される化学感覚は、頭部を動かさない状態でも濃度の左右差、つまり方向が明確に識別可能である [4, 5]。この鼻腔内三叉神経の刺激は電気刺激によっても可能であることが示唆されており、特有の化学感覚の惹起が報告されている [6, 7]。またこのような三叉神経系の知覚は嗅覚系と相互に影響を与えることが知られている [8, 9, 10]。

これらを踏まえると、嗅覚系から匂いの質に関する情報と三叉神経系から感覚の方向に関する情報を同時に提示すると、これらの2つの系からの情報が脳内で統合される際に、三叉神経由来の情報が嗅覚と関連すると見なされたク

ロスモーダルな感覚統合処理が行われ、嗅覚系由来の匂いの方向知覚が生じる可能性が考えられる。本研究ではこのような仮説に基づき、匂いを提示しながら同時に三叉神経を刺激するような電気刺激を行うことで擬似的に匂いの方向を提示する手法を提案し、またその基礎的検証を行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 嗅覚の方向知覚

人間は匂い源に対して空間内を移動し異なる位置での匂い濃度をサンプリングすることでその位置を特定するが、静止している状況では匂いの左右の識別も困難である。しかしメントールのような三叉神経系も活性化する匂い物質に限っては、左右の鼻孔間の濃度差を認識し匂いの側方化を行うことが可能だと複数の研究で示されている [4, 5]。

### 2.2 嗅覚系と三叉神経系の相互作用

嗅覚系と三叉神経系間の相互作用についてはこれまでに電気生理学や脳機能イメージングの研究によって実証されており [8], 実際大半の匂い物質は日常で嗅ぐ程度の濃度では三叉神経を刺激しないものの、高濃度においては嗅覚系・三叉神経系の両方を活性化する。嗅覚系・三叉神経系の一方のみを刺激する化学物質も存在するが、両者を同時提示するとクロスモーダルな感覚統合処理が行われる脳部位が活性化される [9], 三叉神経刺激物質の側方化能力が向上する [10] といった相互作用が生じる。

これらの研究を踏まえると、三叉神経を刺激しない匂い物質や低濃度の匂い物質であっても、同時に何らかの手法で三叉神経を刺激することによってクロスモーダルな感覚統合処理が生じ、匂い方向を錯覚する可能性が考えられる。

### 2.3 電気刺激による三叉神経刺激

三叉神経活性化の手法としては CO<sub>2</sub> などによる化学刺激、電気刺激、エアパフによる機械刺激が挙げられる [11]。化学刺激や機械刺激の制御の難しさや装置のコストパフォーマンスを考慮し、本研究では電気刺激による手法を選択した。電気刺激による手法の例として、Brooks らは鼻中隔への電気刺激を行ってチクチクする、温かいといった三叉神経刺激特有の感覚を誘起し、またその強度と方向を提示する手法を提案した [6]。しかしこの手法ではデバイスを鼻中隔を挟むように装着して鼻孔の一部を塞ぐため、本研究のように匂いの提示と同時に三叉神経刺激を行いたい場合には適切ではない。またその他の電気刺激による三叉神経刺激に関する研究には鼻腔内に電極を挿入する手法が多く、外科的手術を受けた患者でのみその有効性が検証されている。

鼻孔を塞がずかつ非侵襲的に三叉神経を刺激できる手法として、Aoyama らによる鼻梁と頸部背面への電気刺激が考えられる [7]。この手法では鼻梁と頸部背面の電極間に直流電流を印加することでツンとした感覚や刺激感などと評される鼻腔内化学感覚を生じることが報告されており、三叉神経を刺激していることが示唆されている。

Aoyama らの研究では鼻梁を跨ぐように電極を貼っていたが、筆者らは予備実験でこの鼻梁の電極位置を左右にずらすことによって、生じる鼻腔内化学感覚を局在化できることを確かめた。そこで本研究では、左右の鼻梁及び頸部背面に電極を貼って電気刺激を行うことで鼻部の左右の三叉神経を刺激し、同時に提示する匂いの方向知覚を擬似的に生成することを試みる。

## 3. 実装

### 3.1 嗅覚提示装置

本研究では電気刺激が擬似的な匂いの空間的な局在を引き起こすかを検証したいため、実験参加者が頭部を移動させて匂いの濃度変化によってその方向を定位しようとすることは避けたい。そこで図 1 に示すような顎を台の上に乗せて頭部を固定する構造の嗅覚提示装置を 3D プリンタで製作した。顎を載せる台の前には 5 つの嗅覚提示ユニットが取り付けられている。この嗅覚提示ユニットは定格電圧 5V の DC ファンが内蔵されており、その前に香料を染み込ませた脱脂綿を格納し送風することで匂いを提示する。制御には Arduino Uno を使用し、Windows PC で実行する Unity アプリケーションとの間でシリアル通信を行った。

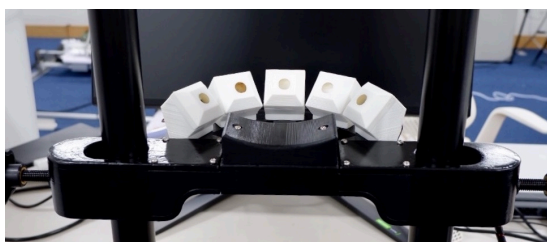


図 1: 嗅覚提示装置

### 3.2 電気刺激装置

電気刺激には Seeedduino XIAO を搭載した定電流型電気刺激装置を自作して使用した。制御は Seeedduino XIAO と PC で実行する Unity アプリケーションとのシリアル通信によって行った。

## 4. 実験

本実験では、匂いを提示しながら鼻梁と頸部背面の電極へ電気刺激を行い、電気刺激によって匂いの方向知覚に影響が生じるかを検証した。なお、本実験は東京大学研究倫理専門委員会の承認を受けて実施した。

### 4.1 実験参加者

本実験は嗅覚に障害を持たない 23~24 歳の 6 名を対象に行った。実験参加者は初めに実験内容について説明を受けた上で同意書に署名し、実験に参加した。

### 4.2 実験条件

#### 4.2.1 呼吸タイミング

本実験では匂い提示と同時に三叉神経を刺激する電流を与えて匂い方向の錯覚の誘起を試みるが、匂いの吸気と同時に電気刺激を行わなければ、匂い物質によって三叉神経が刺激されているというクロスモーダルな処理が起こらず匂い方向の錯覚は生じないと予想される。そこでディスプレイに 4 秒周期の呼吸タイミング指示を表示し、実験参加者に自身の呼吸を指示に同調させてから刺激を行った。

#### 4.2.2 嗅覚刺激

嗅覚刺激の匂い物質には、2-フェニルエチルアルコール (以下 PEA) (富士フィルム和光純薬株式会社) を使用した。PEA はバラの花の芳香を持ち、高濃度でも三叉神経を刺激しない pure odorant として知られている。本実験では PEA をプロピレングリコール (富士フィルム和光純薬株式会社) で  $10^{-1}$  倍に希釈して脱脂綿に染み込ませ、図 1 の 5 つの嗅覚提示ユニットのうち真ん中のユニットに入れて実験参加者の鼻の正面から匂いが提示されるようにした。匂いを左右の嗅覚提示ユニットからではなく真ん中から提示したのは、人間はそもそも三叉神経を刺激しない PEA の匂いの左右差を識別することができないため、真ん中から匂いを提示しても左右から提示しても変わりはないと考えたためである。一方で実験参加者には嗅覚刺激は 5 つのユニットのうち左右の端のどちらかから提示されるためその方向を判断するようにと伝えた。嗅覚刺激は、実験参加者の呼吸が呼吸タイミング指示に同期した後に、呼気から吸気に切り替わるタイミングから 2 秒間提示した。

#### 4.2.3 電気刺激

本実験では図 2 に示すように、左の三叉神経を刺激したい場合には鼻梁の左側に陽極と頸部背面に陰極を、右の三叉神経を刺激したい場合には鼻梁の右側に陽極と頸部背面に陰極を貼り電気刺激を与えた。

刺激は本刺激、sham 刺激の 2 種類の刺激を電流値 0.6 mA, 0.8 mA, 1.0 mA で提示し、計 6 種類の電気刺激を用いた。本刺激には周波数 120 Hz, duty 比 0.5 の正の片側矩形波を、

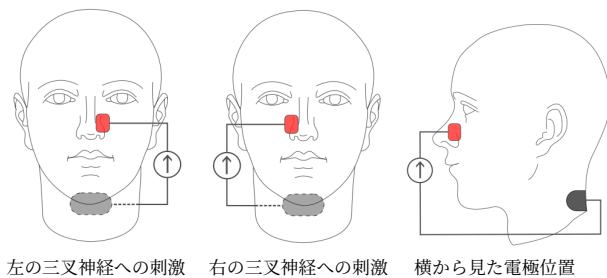


図 2: 電極の位置

sham 刺激には正の直流電流を採用した。Aoyama らによると、正の直流電流で刺激を与えると電流が切れた瞬間に鼻腔内化学感覚が生じる [7]。つまり電流値が正の値から 0 mA になった瞬間に三叉神経が刺激されると考えられる。このことからパルス波を使用すれば立ち下りの度に三叉神経が刺激されると考え、本刺激には 120 Hz の正の片側矩形波を用いることとした。また sham 刺激の正の直流電流に関しては、電流印加中は鼻腔内化学感覚が生じないため三叉神経は刺激されていないと考えられることから、嗅覚刺激提示中の 2 秒間は電流値を落とさず、その後 5 秒間息を吐き続けるように実験参加者に指示し、その間に電流値を直線的に 0.5 秒かけて 0 mA に落とすように設定した。これによって sham 刺激では嗅覚刺激提示中は三叉神経は活性化されず匂いの方向知覚には影響しないと考えた。

また呼吸が呼気から吸気に切り替わってから匂いが吸い込まれるまでの時間差を考慮し、呼気から吸気に切り替わったタイミングの 100 ms 後から電気刺激を開始した。

#### 4.3 評価方法

電気刺激で擬似的な匂い方向知覚が生じるかを検証するため、刺激提示後に「匂いを左右のどちらから感じたか」を二肢強制選択法で実験参加者に回答させた。各電気刺激条件に対して、電気刺激の方向と実験参加者の回答が一致した割合をスコアとして提案手法の評価に用いた。また匂いの左右の回答後に、「回答への自信度合い」を 7 段階のリッカート尺度で回答させ、電気刺激条件が匂い方向知覚に対する自信にも影響するかを検証した。

#### 4.4 実験手順

実験参加者は同意書記入後、鼻梁と頸部背面へ電極を貼り付けて電気刺激を感じるかまた痛みはないかを確認し、実験を開始した。試行開始前には実験参加者に一度 PEA の匂いを確認・記憶させ、以降の試行では他の匂いや電気刺激による鼻腔内化学感覚に惑わされることなく PEA の匂いのみ集中して回答するように指示した。

その後実験参加者は嗅覚提示装置の顎台に顎を載せノイズキャンセリングヘッドホンを付けてから、試行を開始した。実験参加者が行なった 1 試行の手順は以下の通りである。

1. 画面上の呼吸タイミング指示に自身の呼吸を合わせる。
2. 呼吸が同期できたと感じた時ボタンをクリックする。
3. カウントダウン後、2 秒間刺激が提示される。

4. 画面の指示に従って 5 秒間息を吐き続ける。sham 刺激提示時はこの間に電流値が 0 mA まで落とされる。
5. 「匂いを左右のどちらから感じたか」及び「回答への自信度合い」を回答する。
6. 20 秒間休憩する。この間、PEA の匂いの順応を低減するためにコーヒーの匂いが提示される。

6 種類の電気刺激条件 (本刺激, sham 刺激それぞれで 0.6 mA, 0.8 mA, 1.0 mA の電流値) に対して 10 回試行を繰り返し、実験参加者 1 人あたり計 60 回の試行を行った。

また、全試行終了後に、三叉神経刺激物質のメントールを含む市販のペパーミントの香料の匂いを図 1 の左右の端の嗅覚提示ユニットから提示し、PEA と電気刺激を同時に提示した本実験の条件と比較して匂い方向の感じ方に違いはあるか、自由回答形式で実験参加者に回答させた。

#### 4.5 結果

「匂いを左右のどちらから感じたか」という質問に対し実験参加者が電気刺激の方向を答えた割合をスコアとして算出した結果を図 3 に示す。本刺激ではいずれの電流値の条件においてもスコアはチャンスレベルの 0.5 程度にとどまり、sham 刺激では電流値が 0.8 mA, 1.0 mA の条件でスコアが 0.6 以上となった。電気刺激によって擬似的な匂い方向が十分に生成されたと言えるか検証するため、各電気刺激条件のスコアをチャンスレベルの 0.5 と比較する Wilcoxon の符号順位検定を行い Holm 法を用いて有意水準を補正した結果、いずれの電気刺激条件においても有意差は認められなかった (本刺激 0.6 mA:  $p = 0.75$ , 本刺激 0.8 mA:  $p = 1.0$ , 本刺激 1.0 mA:  $p = 0.88$ , sham 刺激 0.6 mA:  $p = 0.75$ , sham 刺激 0.8 mA:  $p = 0.38$ , sham 刺激 1.0 mA:  $p = 0.063$ )。また、刺激の種類と電流値がスコアに与える影響について検証するために Aligned Rank Transform [12] を行った後に、刺激の種類 (本刺激, sham 刺激) と電流値 (0.6 mA, 0.8 mA, 1.0 mA) を参加者内要因とした二要因分散分析を行ったが、いずれの主効果も交互作用も認められなかった (刺激種類の主効果:  $p = 0.18$ , 電流値の主効果:  $p = 0.89$ , 交互作用:  $p = 0.49$ )。

さらに、「回答への自信度合い」という質問に対する結果に対しても Aligned Rank Transform で変換を行った後に刺激の種類と電流値を参加者内要因とした二要因分散分析を行ったが、いずれの主効果も交互作用も認められなかった (刺激種類の主効果:  $p = 0.41$ , 電流値の主効果:  $p = 0.94$ , 交互作用:  $p = 0.95$ )。

また三叉神経を活性化させるペパーミントの匂いとの比較では、「試行で匂いの方向を強く感じた時とペパーミントの匂いを比べると、匂いの左右方向の感じ方は同じ」という回答が複数得られた。

#### 5. 考察

本実験では、本刺激で三叉神経が活性化され嗅覚系とのクロスモーダルな処理によって擬似的な匂い方向が知覚されるのではないかと考えたが、仮説を支持する結果は得られなかった。本刺激の 120 Hz 連続矩形波刺激は筆者らによる

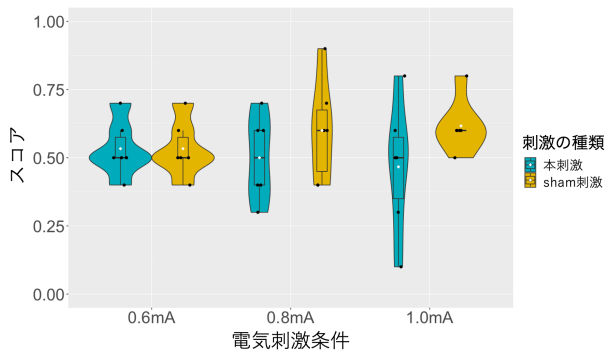


図 3: 各電気刺激条件でのスコア

予備実験で決定したものであるが、この刺激では、Aoyamaら [7] の手法と比べて惹起される鼻腔内化学感覚の時間は長いものの、その感覚の強度は非常に微弱であった。つまり、三叉神経刺激が非常に微弱であるために、十分に匂いの方向知覚を変化させられなかった可能性がある。

また sham 刺激では三叉神経が刺激されず本刺激よりもスコアはチャンスレベルの 0.5 に近くなると予想したが、仮説に反して sham 刺激の方がスコアは高くなった。このことから正の直流電流である sham 刺激の印加中は鼻腔内化学感覚は感じられないものの、無意識下のレベルで三叉神経が刺激されており匂いの方向知覚に影響を与えた可能性が考えられる。しかし今回の sham 刺激は本刺激よりは効果的であるだろうと考えられるが、「回答への自信度合い」が刺激の種類で変わらなかったことやスコアの平均値が 0.6 程度であることから、sham 刺激としていた正の直流電流刺激も最適な電気刺激条件だとは考えにくい。また同一の電気刺激条件であっても効果の見られた時と見られなかった時があったため、本実験で統制した条件以外でも擬似的な匂い方向提示の可否に関わる重要な条件があると考えられる。

ペーパーミントの匂い方向の感じ方との比較に関するアンケートの結果や、実験後アンケートで「電気刺激の方向に匂いを感じるが多かった」という回答が多かったことから、電気刺激によって確かに擬似的な匂い方向は提示できると推測される。しかし、その効果に大きく寄与する刺激のパラメータは未解明である。今後はこのパラメータを同定し、効果的に匂いの方向知覚を制御する刺激の設計とその実証を行う予定である。

## 6. おわりに

本研究では匂い提示と同時に鼻腔外からの電気刺激で三叉神経を刺激することで擬似的に匂い方向を提示する手法を提案し、その基礎検証を行った。実験参加者のアンケート回答などから、電気刺激による擬似的な匂い方向提示は可能だと推定できるが、十分な効果は見られなかった。今後は効果的な電気刺激条件を精査し、最終的には匂いによるナビゲーションなどの応用も可能な手法の確立を目指す。

**謝辞** 本研究の一部は科研費 基盤研究 (B)(22H03628) および JST さきがけ (JPMJPR19J1) による助成を受けた。

## 参考文献

- [1] X. Wang and Z. Liu, "User Experience Design of Navigation via Sense of Smell in Indoor Environment: A Case of Shopping Mall," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 624–636, 2021.
- [2] T. Yamada, S. Yokoyama, T. Tanikawa, K. Hirota, and M. Hirose, "Wearable olfactory display: Using odor in outdoor environment," *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, pp. 199–206, 2006.
- [3] S. Menzel, T. Hummel, L. Schäfer, C. Hummel, and I. Croy, "Olfactory change detection," *Biological Psychology*, vol. 140, pp. 75–80, 2019.
- [4] G. Kobal, S. Van Toller, and T. Hummel, "Is there directional smelling?," *Experientia*, vol. 45, no. 2, pp. 130–132, 1989.
- [5] I. Croy, M. Schulz, A. Blumrich, C. Hummel, J. Gerber, and T. Hummel, "Human olfactory lateralization requires trigeminal activation," *NeuroImage*, vol. 98, pp. 289–295, 2014.
- [6] J. Brooks, S.-Y. Teng, J. Wen, R. Nith, J. Nishida, and P. Lopes, "Stereo-smell via electrical trigeminal stimulation," *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2021.
- [7] K. Aoyama, N. Miyamoto, S. Sakurai, H. Iizuka, M. Mizukami, M. Furukawa, T. Maeda, and H. Ando, "Electrical generation of intranasal irritating chemosensation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106714–106724, 2021.
- [8] G. Brand, "Olfactory/trigeminal interactions in nasal chemoreception," *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, vol. 30, no. 7, pp. 908–917, 2006.
- [9] J. Boyle, J. Frasnelli, J. Gerber, M. Heinke, and T. Hummel, "Cross-modal integration of intranasal stimuli: A functional magnetic resonance imaging study," *Neuroscience*, vol. 149, no. 1, pp. 223–231, 2007.
- [10] C. Tremblay and J. Frasnelli, "Olfactory and Trigeminal Systems Interact in the Periphery," *Chemical Senses*, vol. 43, pp. 611–616, 07 2018.
- [11] E. Iannilli, C. Del Gratta, J. Gerber, G. Romani, and T. Hummel, "Trigeminal activation using chemical, electrical, and mechanical stimuli," *PAIN*, vol. 139, no. 2, pp. 376–388, 2008.
- [12] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins, "The Aligned Rank Transform for Non-parametric Factorial Analyses Using Only Anova Procedures," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 143–146, 2011.