



匂いセンサ及び匂いの記録再生システム

中本高道

東京工業大学



1. はじめに

最近、五感情報通信の可能性が議論されるようになり、視覚、聴覚に嗅覚情報を加えた次世代技術への期待が序々に高まっている。そのためには、匂いをセンシングする技術と匂いを再生する技術が必要であり、筆者らはこれらを同時に実現することを目指して匂いの記録再生システムを提案した [1].

匂いセンサに関する研究は、これまで多くの研究がある [2]. 匂いの情報を客観的に実時間で記録するためには、匂いセンサは有用なデバイスである。匂いセンサでは、特性の異なる複数のガスセンサの出力パターンをパターン認識して、匂いの種類を識別する [3]. 最初に複数の半導体ガスセンサ出力パターンをパターン認識して、匂いの識別を行う手法が英国のグループによって提案され [4], その後筆者のグループによりニューラルネットを用いてパターン認識する方法が示された [5]. そして、多くの研究者がこの分野に参入して一部商品化されるものも出てきた。

一方、香りを発生させて人に提示する嗅覚ディスプレイの研究も最近行われるようになってきた [6]. コンピュータで制御した香り Diffuser をインターネットに接続したり [7], 香り濃度を変化させて香り発生源からの距離変化を体感したり [8], 空気砲により特定の人にのみ香りを提示する方法等が提案されている [9].

さらに多様な匂いを再生させるためにはいくつかの

要素臭を任意の比率で調合して発生させる方法が有効である [10]. その方法としては、MFC(Mass Flow Controller)のような流量調節器を用いる方法 [11], インクジェット素子を用いる方法 [12], 高速電磁弁開閉方式を用いる方法 [13] 等がある。これらの嗅覚ディスプレイに関する研究は、まだ歴史が浅く実用的なものはこれから発展していくであろう。

筆者のグループが提案している匂いの記録再生システムは、匂いセンサと嗅覚ディスプレイを結びつけて、センシング能力の向上を図ると共に匂い再生の機能を持たせたものである [14]. ここでは匂いセンシングシステムを中心に説明し、動的な香りの変化の記録再生等の最近の話題を紹介することにする。

2. 匂いセンサの仕組み

生体嗅覚では、特性の異なる多数の嗅細胞の応答パターンを嗅覚神経系でパターン認識しているという [15]. 特異性に優れたセンサが特定の分子を認識するのはバイオセンサでよく見られる原理である。しかし、嗅覚の場合は、各嗅細胞の特異性は必ずしも大きいわけではなく、その代わりに多数の嗅細胞の応答パターンのパターン認識が必要となる。

匂いセンサではこの原理に基づき、図1に示すように特性の異なる複数センサの出力パターンをパターン認識する。パターン認識には判別分析法などの多変量解析

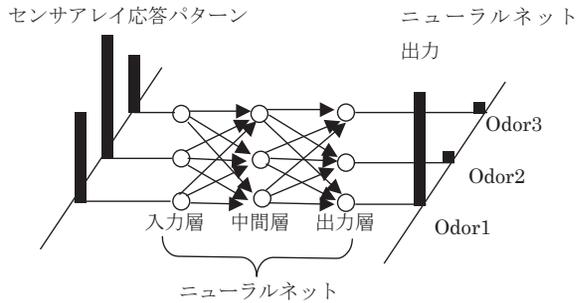


図1 匂いセンサの仕組み

手法、バックプロパゲーション法、LVQ(Learning Vector Quantization)法、RBF(Radial Basis Function)法等のニューラルネットワーク [16] が用いられるが、多く用いられるバックプロパゲーション法の場合について、学習の方法を説明する。

図1に示す MLP(MultiLayer Perceptron)を用いることを考える。最初にセンサアレイ応答パターンとそれに対応するネットワークの望ましい出力の対をネットワークに与えて学習させる。この望ましい出力を教師信号と呼び、匂いの識別を行なう場合には匂いの種類に対応して特定の出力層ニューロンのみが応答するように教師信号を設定する。図1では、出力層では与えられたセンサアレイ応答パターンに対してニューロン1のみが応答し、ニューロン2,3は応答しないように教師信号を与えて学習させている。

学習は各匂いについて複数回測定したデータセットを用いて繰り返行なう。このために学習には通常時間がかかる。しかし、いったん学習が終了したら測定したセンサアレイ応答パターンをニューラルネットワークに入力すると対応する出力層ニューロンのみが応答するようになる。

ニューラルネットワークを用いる場合は、学習時間がかかるが、微妙な匂いの違いやドリフトや経時変化を含んだデータなど複雑な判別境界を形成する必要があるときに有効である。最近、判別境界にマージンを持たせるように構成する SVM (Support Vector Machine) も研究され、匂いセンサへの応用も試みられている [17]。

センサ素子としては、半導体ガスセンサ、導電性高分子ガスセンサ、光学式ガスセンサ、弾性表面波ガスセンサ、カンチレバー型ガスセンサ、電気化学ガスセンサ、水晶振動子ガスセンサ等が用いられる [2]。

異なる特性をもつセンサ素子を実現する方法は、例えば、半導体ガスセンサの場合は、不純物の種類、ドーピング量、動作温度等を変えて実現する。水晶振動子ガス

センサの場合は、水晶板に塗布する感応膜の種類を変えることにより実現する。

筆者のグループは、この中で水晶振動子ガスセンサを中心に研究を行っている。水晶振動子に多様な感応膜を用いることにより、特性の異なるセンサを容易に製作することができる。また、人間とセンサの感度特性は比較的似ており、人間が微量でも強く匂いを感じる物質に対して感度が高い特長がある [18]。さらに、その出力が周波数変化であるために計測部やパターン認識部をデジタル回路で容易に構成でき、アナログ回路よりも容易に LSI(匂い認識チップ)を作ることができる。このチップによりハンディなセンシングシステムを実現することも可能になる。

水晶振動子ガスセンサの構造を図2に示す。同図は横から見た構造図である。水晶振動子は水晶板の上下に電極を蒸着もしくはスパッタ法で取り付け、その上に匂いを吸着する感応膜を塗布して製作したものである [19]。水晶振動子はその発振周波数が安定なために、携帯電話やコンピュータの基準信号を発生させる素子として広く用いられる。水晶振動子は発振回路に接続され、振動子の共振周波数近傍で発振する。

水晶は圧電性を持ち、結晶の切断方位により圧電性や温度特性等の性質が異なる。通常、AT-CUT という温度

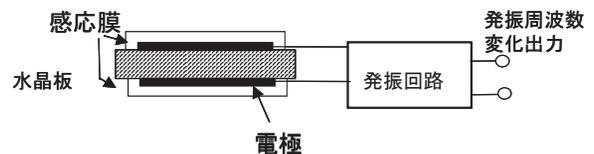


図2 水晶振動子ガスセンサ、(a) 構造図、(b) 写真

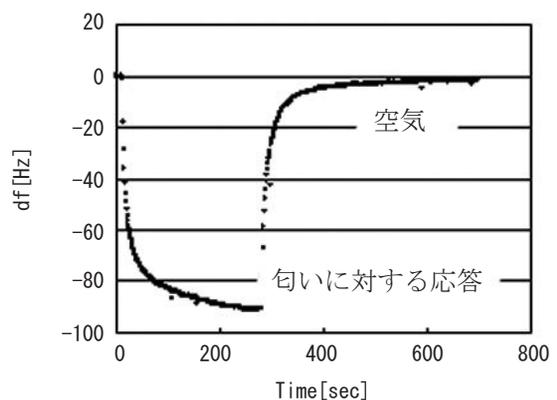


図3 センサ応答波 (振動子 : 77MHz,AT-CUT, 感応膜 : FFAP, 匂いサンプル n-amyl acetate,73ppm)

特性の優れたカットで切断された結晶を用いる。高周波電圧を振動子に印加すると、音波が圧電性により励起され、振動子の厚み方向に多重反射して共振し、AT-CUTでは厚みすべり振動により動作する。

実際のセンサ応答波形を図3に示す。匂いが感応膜に吸着すると、質量負荷効果により吸着した質量に比例して振動子の共振周波数が減少する[20-21]。その周波数変化をセンサ出力として周波数カウンタにより測定する。センサ周辺の匂いが清浄空気に置換されると吸着した匂いが脱着して共振周波数は元に戻る。そのため、センサは繰り返し匂い応答測定に使用することができる。

3. 匂いの記録再生システム

上述の匂いセンサを用いて匂いを記録するだけでなく、記録した匂いを再生するシステムが匂いの記録再生システムである。図4にシステムの原理を示す[1]。システムは、ガスセンサアレイと匂いブレンダ及びコンピュータから成立っている。最初、対象臭をセンサアレイに導入し、その応答パターンを記録する。次に匂いブレンダで調合した香りをセンサアレイに導入し、その応答パターンを対象臭のそれと比較する。両者が一致すれば、その時の調合臭レシピが対象臭レシピとなる。一致しない場合は、一致する方向に調合臭レシピを変更して再度対象臭に対する応答パターンと比較する。レシピ変更と応答パターンの比較を繰り返して最終的に収束すれば、その時の調合臭のレシピより対象臭のそれを知ることができる。このレシピ変更のアルゴリズムにはMIMO(MultiInput MultiOutput)制御で用いられる最適制御フィードバックを用いている[22]。

対象臭に含まれるガス成分はすべて要素臭として準備されているとは限らない。その場合は、使用できる要素臭を用いて、最もセンサアレイ応答パターンが近くなるような調合臭のレシピを求める。多くの成分からなる対

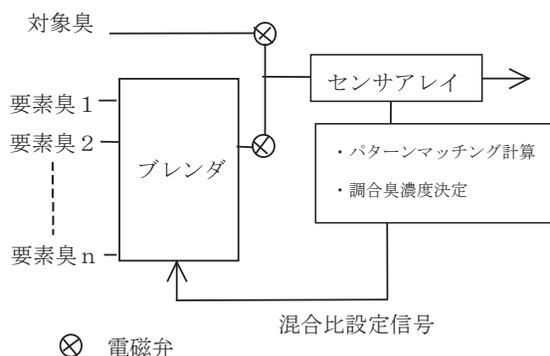


図4 匂いの記録再生システムの仕組み

象臭を少ない成分の要素臭の比率で表すことを、ここでは匂いの近似と呼んでいる[23]。

このようにして匂いレシピを記録するが、いったんレシピが求まったら匂いブレンダでその匂いを再生させることができる。

4. 動的な匂い変化の記録と再生

匂いの記録再生には、動的手法と静的手法がある。静的な手法は、対象臭の濃度及びレシピを一定として測定する方法で、筆者のグループは最大8要素臭を使用した匂いの記録再生に成功した[24]。ここでは、匂いが動的に変化する場合の記録再生について述べる。

筆者らのグループは実時間参照方式という手法を開発した[25]。この手法は匂いの動的変化の記録再生に有用なだけでなく、環境変化(温度、湿度等)に伴うセンサ特性の変動を補償するのにも有効な方法である[26]。

静的手法(従来法)と動的手法(実時間参照方式)の比較を図5に示す。従来の静的手法の場合は、最初に一定濃度の対象臭のセンサ応答を測定し、その定常応答を記録する。その後、調合臭の濃度をセンサ応答結果にもとづいてフィードバック制御しながら調節し、センサ応答が対象臭と同じになったところで調合臭のレシピを決定する。この方法では対象臭のレシピを求めるのに数分かかるので、その間に生じた対象臭の変化を検出することはできない。

それに対して、実時間参照方式では、数秒毎に対象臭と調合臭を切り替えて、センサアレイに導入する。最初は対象臭と調合臭の濃度はずれているので、センサ応答も両者の場合差が生じる。しかし、両者に対するセンサ応答の差を小さくする方向に調合臭の濃度を調整し、収束すると両者のセンサ応答の差はなくなる。このような方式を採用することにより、数秒程度の時間分解能で対象臭変化を記録することができ、さらにセンサ特性の変

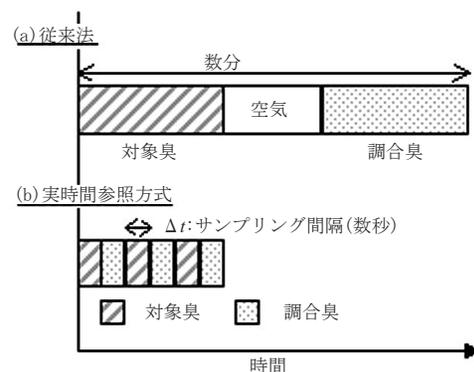


図5 従来法と実時間参照方式の比較

動を補償することができる。

4要素臭の匂いの各成分が変化した場合、各成分の濃度変動の記録実験を行った結果を紹介する。用いた匂いは、りんご臭に含まれる、trans-2-hexenyl acetate(グリーンノート, Comp1), trans-2-hexenal(青臭い匂い, Comp2), isobutyric acid(甘酸っぱい匂い, Comp3), ethyl valerate(フルーティな果肉感, Comp4)を用いた。対象臭と調合臭の切替は4秒毎に行った。使用したセンサは、異なる感応膜(Polyphenyl ether, polyethylene glycol 1000, tricresyl phosphate, Apiezon L)を塗布した4個の水晶振動子(20MHz, AT-CUT)である。

実験結果を図6(a)に示す。実線及び破線は対象臭内の各要素臭の濃度変化であり、プロットが実際に記録した各要素臭の濃度である。この場合、対象臭は前述の匂いブレンドを用いて発生させたので、対象臭内の各濃度は匂いブレンドの設定値である。両者間で若干ずれがあるものの、記録した各要素臭濃度はほぼ対象臭のそれと一致し、このように動的に匂いの変化してもその変化を記録できることがわかった。

実験の際は、実験の途中で実験室内の空調機のモード(DRY/COOL)を切り替えることにより、温度と湿度を変化させた。その結果、図6(b)に示すように湿度は20%

程度、温度は2.5°C程度実験中に変化した。実験の結果、本手法により温度湿度等の環境変動を補償することが可能であることがわかった。

本手法では、センサアレイは1つであり、そこに対象臭と調合臭を切り替えて導入するために、匂いの切替にある程度の時間を要する。さらに高速化するには、この切替をなくして2個のセンサアレイを用いればよい。この手法を用いれば、5-10秒程度の匂いの変化も精度よく記録できる[27]。

5. まとめ

匂いセンサ及び匂いの記録再生システムについて紹介した。匂いセンサや匂いの記録再生システムは人工現実感の分野ではまだ十分な知名度を得ていないが、視聴覚について嗅覚の人工現実感を実現するためには、重要なツールとなるであろう。現在はまだ研究者も少ないが、今後人工現実感の研究者も嗅覚の領域に参入してこの分野が発展することが望まれる。

参考文献

[1] T.Nakamoto, Y.Nakahira, H.Hiramatsu, T.Moriizumi: Odor recorder using active odor sensing system, Sens. &

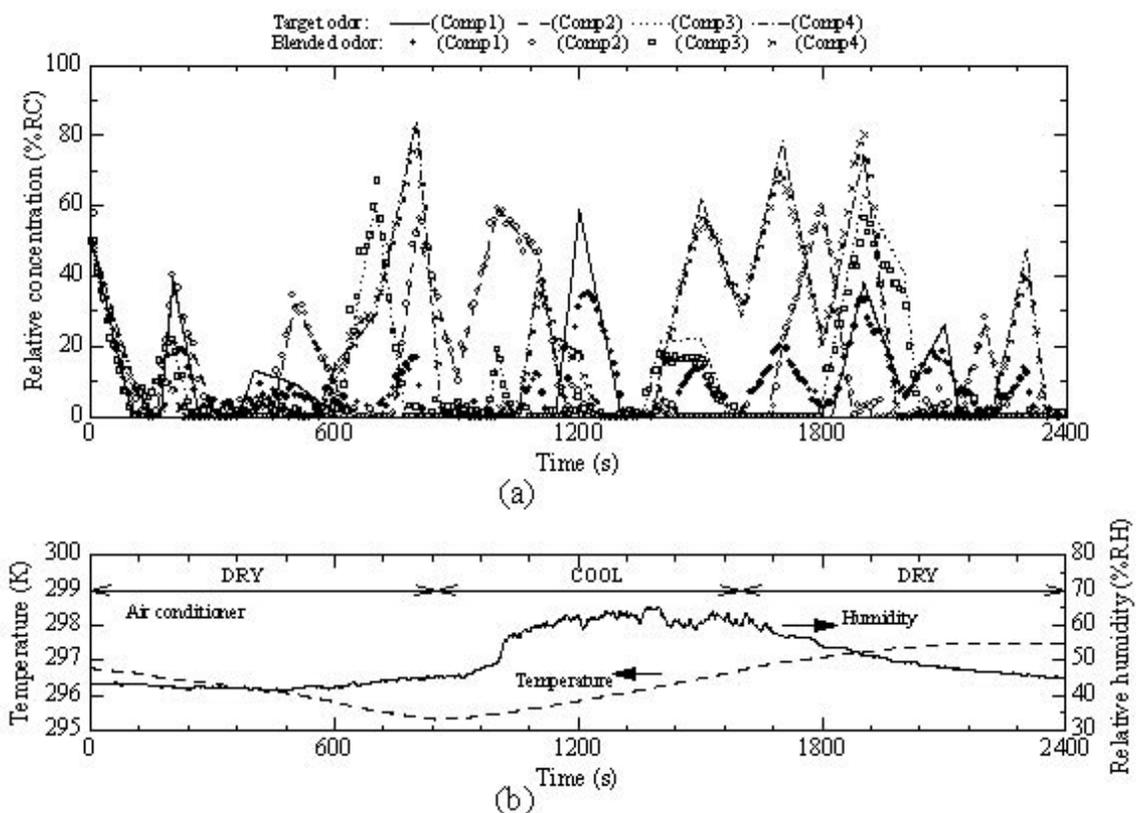


図6 実時間参照方式による動的匂い変化の記録結果。(a)各要素臭の濃度変化、(b)温度及び湿度変化

- Actuators B, 76 (2001) 465.
- [2] T.C.Pearce, S.S.Schiffman, H.T.Nagle, J.W.Gardner Eds.: Handbook of machine olfaction (2003) Wiley-VCH.
- [3] 森泉, 中本: センサ工学, 昭晃堂 (1997)
- [4] K.C.Persaud and G.Godd: Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose, *Nature*, 299 (1982) 352.
- [5] T.Nakamoto and T.Moriizumi: Odor sensor using quartz-resonator sensor array and neural-network pattern recognition, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* p.613(1988)
- [6] F.Davide, M.Holmberg, I.Lundstrom, Virtual olfactory interfaces: electronic noses and olfactory displays, G.Riva and F.Davide (Eds.), *Communication through Virtual Technologies*, IOS Press, p.193 (2001)
- [7] Jacques Messager: インターネットで香りを配信するシステム, アロマサイエンスフォーラム講演要旨集, p.2 (2002)
- [8] 廣瀬: 五感情報と嗅覚メディア, *Aroma Research*, 3 (2002) 60.
- [9] Y.Yanagida, S. Kawato, H.Noma, A.Tomono, N.Tetsutani, Projection-based olfactory display with nose tracking, *Proc. IEEE Virtual Reality 2004*, p.43 (2004)
- [10] 中本, 森泉: 匂い情報の記録・再生及び通信システムへの展望, 日本人工現実感学会, 7 (2002) 11.
- [11] T.Nakamoto, S.Utsumi, N.Yamashita, T.Moriizumi, Y.Sonoda, Active gas/odor sensing system using automatically controlled gas blender and numerical optimization technique, *Sens. & Actuators B*, 20 (1994) 131.
- [12] T.Nakamoto, H.Takigawa, T.Yamanaka, Fundamental study of odor recorder using inkjet devices for low-volatile scents, *Book of Abstract, Int. Symp. on Organic Molecular Symp.* p.49 (2004)
- [13] T.Yamanaka, R.Matsumoto, T.Nakamoto, Study of odor blender using solenoid valves controlled by delta-sigma modulation method, *Sens. & Actuators B*, 87 (2002) 457.
- [14] 中本, 山中: 匂いセンサを用いた匂いレシピの記録及び再生システムの研究, 計測自動制御学会, 42 (2003) 679.
- [15] G.M. Shepherd. *Neurobiology*, Oxford Press, p.238 (1988)
- [16] 中本: 人工ニューラルネットワークと匂いセンサへの応用, 味と匂いの学会誌, 10 (2003) 111.
- [17] C.Distante, N.Ancona, P.Siciliano, Support Vector Machine for olfactory signals recognition, *Sens. & Actuators B*, 88 (2003) 30.
- [18] 中本: 匂いセンサ, 電気学会全国大会シンポジウム, 2002, 3-S24-3.
- [19] W.H.King, Piezoelectric sorption detector, *Anal. Chem.*, 36 (1964) 1735.
- [20] G.Sauerbrey, Verwendung von Schwingquarzen zur Mikrowagung, *Z.Phys.*, 155 (1959) 289.
- [21] T.Nakamoto and T.Moriizumi, A theory of a quartz crystal microbalance based upon a mason equivalent circuit, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 29 (1990) 1735.
- [22] T.Nakamoto, N.Okazaki, T.Moriizumi, High speed active gas/odor sensing system using adaptive control theory, *Sens. & Actuators B*, 41 (1997) 183.
- [23] S.Munoz, T.Nakamoto, T.Moriizumi, Odor approximation of fruit flavors using a QCM odor sensing system, *Dig. of Technical papers, Transducers'03*, 2003, 1367.
- [24] T.Yamanaka, R.Matsumoto, T.Nakamoto, Fundamental study of odor recorder for multi-component odor using recipe exploration based on singular value decomposition, *IEEE Sensor Journal*, 3 (2003) 468.
- [25] T.Yamanaka, T.Nakamoto, Real-time reference method in odor recorder under environmental change, *Sens. & Actuators B*, 93 (2003) 51.
- [26] 山中, 中本: 実時間参照方式による匂い記録・再生システムの環境変化に対するロバスト性向上, 電学論, 122-E (2002) 312.
- [27] 中本: 匂いレシピの記録と再生を行うシステム, 化学センサ, 20 (2004) 2.

【略歴】

中本高道 (NAKAMOTO Takamichi)

東京工業大学 大学院理工学研究科 助教授

1984年東京工業大学理工学研究科修了, 同年日立製作所入社, 1987年東京工業大学工学部助手, 1993年より現職, 1996-1997年米国 Pacific Northwest 研究所客員研究員, 専門はセンサ工学. 著書『センサ工学』(共著), 『電気電子計測入門』.