匂いセンサを用いた匂いの記録再生システム

中 本 高 道

東京工業大学大学院理工学研究科
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(2005 年 5 月 2 日受理)

Odor Recorder Using Odor Sensing System

Takamichi NAKAMOTO

Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552

(Received May 2, 2005)

An odor recorder for recording recipe of smell as well as reproducing it has been developed. It includes an array of sensors with partially overlapping specificities, odor blender and its recipe modification algorithm implemented in a computer. In the odor recorder, the recipe of the blended odor is iteratively modified so that the output pattern of the blended odor can agree with that of the target odor. The real-time reference method was developed to suppress the influence of the environmental change and to record the dynamical change of the odor. The target and blended odors are alternately supplied to the sensors and the recipe of the blended odor is adjusted so that the difference of the sensor responses between the two can be minimized. The dynamical change of the recipe of the four component odors in the apple flavor was successfully recorded without the influence of the environmental disturbance such as temperature and humidity changes.

1. は じ め に

近年、視聴覚情報の記録再生技術の発達はめざましい。小型で簡単な装置で高品質のデータをコンピュータに取り込み再生することが可能になり、デジタルカメラや携帯電話のカメラ機能の普及後は一段と視聴覚情報をコンピュータで扱う機会が増えてきた。文章や音声のみの

説明では様子がわからなくても簡単に映像を記録してメールに添付できるので、通信相手の様子を把握するのが容易になった。今後は他の感覚情報の記録再生技術が必要となってくるであろう。その感覚の1つとして、嗅覚情報を取り上げることとする。

匂いを記録するためには、匂いを計測するセンサが必要になる。従来から用いられてきた GC/MS (Gas Chromatograph/Mass Spectrometry) 法¹⁾は装置が大掛かりである上に前処理が必要であったり測定に時間がかかるために、簡便なセンサが必要とされる。筆者のグループは匂いセンサを以前より研究しており^{2, 3)}、この匂いセンサを匂い記録に用いることにした。匂いセンサは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ことにより、匂いを識別するのが基本原理である⁴⁾。

匂いセンサは主に匂い種類の判別に用いられることが多いが、混合臭の各成分の濃度を求めることにも使われる。混合臭の問題には重回帰分析法や PLS (Partial Least Squares) 法が主に用いられていたが⁵⁾、センサ出力が各成分の線形重ね合わせにならない場合、誤差が多くなる。ニューラルネットワークを用いれば非線形性の問題は解決できるが、単なる写像の方法としてニューラルネットワークを用いるだけでは化学センサでしばしば生じるドリフトやエージングの問題には対処できない。そこで、筆者のグループは能動型匂いセンシングシステムを提案した⁶⁾。この能動型匂いセンシングシステムを発展させて、匂いを計測するだけでなく作り出すのに応用することを考え、ビデオテープで画像を記録し再生するように匂いを再生するシステムの研究に着手した^{7, 8)}。

我々の身の回りには数多くの香りに関係した商品が存在する。匂いの記録再生が可能になると、匂いを嗅ぎながらこれらの商品をオンラインショッピングすることもできるようになる。また、商品ディスプレイとして店の店頭において香りを体感してもらうこともできるようになる。さらに人工現実感、ゲーム等多くの分野で新しい領域が開けてくる。また、視覚や聴覚とあわせて嗅覚刺激を提示すればさらに用途が広がる。

匂いの記録再生をすべての匂いを対象にして行う場合には、色の3原色のように匂いの原臭が必要になる。原臭に関しては Amoore の説があるが、まだ十分に確立されていない⁹⁾。そこで、現状では匂いの範囲を限定して範囲内の匂いを実現することを目指し、今後データを蓄積しながら次第にその範囲を広げていくことにする。人の官能検査に頼って原臭を探していくのは気が遠くなるような労力を要する。匂いセンサを用いれば、膨大な客

観的な情報を自動化された測定により蓄積していくことが可能になる。

また、大気中を漂う匂いはその強度も質も時間と共に変化する。一定の匂いのレシピだけでなく、時々刻々と強度と質が変化する様子を記録し再生する技術も必要になってくる。さらにセンサ特性は温度や湿度に依存するが、そのような環境変化に対してロバストなシステムも必要になる。本稿では、環境変化に対してロバストで匂いの動的変化を記録再生する方法およびその実験例を紹介することにする。

2. 匂いの記録再生システムのしくみ

匂いの記録再生システムの原理図を Fig. 1 に示す。システムは、センサアレイ (特性の異なる複数のセンサ)、匂い調合装置とレシピ変更アルゴリズムを実装したコンピュータから成る。匂い調合装置とは多数の要素臭を任意の比率で混合して匂いを調合する装置である。

センサ素子としては、水晶振動子ガスセンサ、SAW (Surface Acoustic Wave) デバイス等の音響デバイスを用いたもの、半導体ガスセンサ、導電性高分子のように抵抗変化を検出するもの、電気化学センサのように電流変化を検出するもの、MOS FET ガスセンサのように FET の閾値電圧変化を用いたもの等がある²⁾。後述の実験例では多様な特性のセンサを簡単に製作できる水晶振動子ガスセンサを用いている。

匂いの記録再生システムの原理は以下のようなものである。まず、対象臭の匂いをセンサアレイに導入して応答パターンを測定する。次に複数の要素臭から匂い調合装置により調合臭を作りセンサアレイに導入してその応答パターンを測定し、対象臭に対するそれと比較する。両者が一致していれば、その時の調合臭レシピより対象臭のレ

シピを知ることができる。一致していない場合は両者が近づくように調合臭のレシピを MIMO (Multiple Input Multiple Output) フィードバック制御により逐次変更する¹⁰⁾。この MIMO フィードバック制御には、最適制御の方法を用いる^{11, 12)}。最終的に収束し両者の応答パターンが一致した時の調合臭のレシピより対象臭のレシピを知ることができる。

ひとつのセンサに関して各要素臭に対する応答が正確に線形重ね合わせで表せるのであれば、上記のような繰り返し処理は不要であり回帰分析法等の多変量解析を用いれば容易に各要素臭の濃度を決定できる。しかし、線形重ね合わせですべての応答を説明できないことが多く、温度や湿度の影響を受けることやセンサ応答がドリフトすることもある。水晶振動子ガスセンサの場合にも感応膜の種類によるが、完全な線形重ね合わせは成立しない。本手法は、相対測定法のためにこれらの影響を受けにくい。

匂い調合装置としては、高速開閉電磁弁方式、マスフローコントローラ方式、インクジェット方式等がある¹³⁾。高速電磁弁開閉方式は、2つの状態 (ON もしくは OFF) の2つの状態しか持たない電磁弁を高速に開閉して、開閉の頻度によりその中間的な濃度を表す方式である¹⁴⁾。その制御には1ビットの A/D 変換方式に使われる $\Delta\Sigma$ 変調方式を採用した。マスフローコントローラを用いる方式では、流量比で各要素臭のレシピを決める。インクジェット方式では、インクジェットにより微小な液滴を吐出した後、ヒータにより加熱して気化させる方式である¹⁵⁾。

いったんレシピが求まれば、内蔵している匂い調合装置で匂いを再生してもよいし、Fig. 1 (b) のように遠隔地に置いた調合装置にレシピ情報をインターネット経由で送って匂いを再生することも可能になる。

3. 実時間参照方式

前節で匂いの記録再生システムの基本原理について述べたが、本節ではそれを拡張した実時間参照方式について説明する。前節の場合は、レシピ探索の間は対象臭のレシピは一定であるが、実際には大気中の匂い濃度などは時々刻々と変化する。そこで、時々刻々匂い濃度およびレシピが変化する場合でも実時間で匂い変化を記録する方式を実時間参照方式と名づけて提案した¹⁶⁾。

Fig. 2 に実時間参照方式の原理を示す。実際には多成分の匂いを扱いセンサ数も複数であるが、同図では簡単のために単一成分の匂いを1つのセンサで記録する図になっている。同図 (a) の従来の方式では、数分間匂いをセンサアレイに供給して対象臭を記録し、空気をセン

Fig. 1. Principle of odor recorder.

Fig. 2. Principle of real-time reference method (a) previous method, (b) proposed method.

サアレイに供給してセンサ応答を回復させた後で調合臭をセンサアレイに供給して、対象臭と調合臭の応答パターンが一致するように調合臭レシピを調節して数分間かけて収束させる。これに対して同図 (b) に示す実時間参照方式では、対象臭と調合臭を数秒ごとに交互にセンサアレイに供給する。最初は両者に対するセンサ応答の差は大きいですが、次第にその差が小さくなって収束していく。

いったん収束すればその状態からのレシピの変化に追従すればよいので、短時間で対象臭のレシピ変化に調合臭のレシピ変化が追いつくことが可能になる。

この方式はレシピの動的変化を捉えるだけでなく、環境変化等による系の状態変化に対するロバスト性の向上にも有効である。次節ではこのロバスト性の向上に関して述べることにする。

4. 実時間参照方式によるロバスト性の向上

2節で述べた匂いの記録再生システムは、相対測定法で匂いのレシピを記録するために、環境変化に対してロバストである。しかし、対象臭の測定中や調合臭の調節中に起きる急激な変化に関しては対処することはできない。前に述べたように、匂いの測定およびレシピ決定に従来法では数分要するからである。たとえば、匂い記録中にクーラが ON になったときなどは温度湿度の変化に

Fig. 3. Experimental setup of real-time reference method.

より、収束せずに発散する現象が発生した。そこで、前節で説明した実時間参照方式を用いて、温度や湿度が急激に変化したときに対象臭レシピの動的変化を記録できるかどうかを検討した。

用いた実験装置を Fig. 3 に示す。ここでは、対象臭も調合臭も電磁弁高速開閉方式の匂い調合装置を用いて発生させた。電磁弁は 50 ms ごとに開閉制御を行っている。

対象臭は本来大気中から吸引すべきであるが、ここでは匂い調合装置で人工的に匂いレシピ変化を作り出している。要素臭はサンプル瓶に液体サンプルを入れて、その上部のヘッドスペースの匂いを用いた。本稿では、各要素臭の濃度を、キャリヤガス（大気）が流れている状態のサンプル瓶ヘッドスペースにおける濃度を 100 % にした場合に対する相対濃度 [%RC] で表す。

同図内のセンサセルには 4 個の感応膜 (Polyphenylether (PPE), Polyethylene glycol 1000 (PEG 1000), Tricresyl phosphate (TCP), Apiezon L) を塗布した水晶振動子 (20 MHz, AT-CUT) を用いた。感応膜の材料はガスクロマトグラフィ固定相材料である。各水晶振動子は発振回路 (one-chip IC) に接続され、FPGA (Field Programmable Gate Array) に実装したマルチチャネル周波数カウンタでその周波数変化を計測する。計測した結果は RS 232 C を介して、ノートパソコンに転送される。その結果に応じて、ノートパソコン内で次の時刻の調合臭のレシピを決め、それによってコンピュータの平行ポートおよび駆動用トランジスタを介して電磁弁を制御して匂いを調合する¹⁷⁾。対象臭と調合臭は 3 秒ごとに切り替えるようにした。

また、本実験では、りんご臭の主要成分である以下の 4 つの匂いを用いた。

Comp 1: trans-2-hexenyl acetate (グリーンノート)

Comp 2: trans-2-hexenal (青臭い匂い)

Comp 3: Isobutyric acid (甘酸っぱい匂い)

Comp 4: Ethyl valerate (フルーティな果肉感)

まず、最初の実験として室温、室内湿度の状態で匂い

の記録実験を行った。実験を行った環境では、対象臭を測定してから調合臭の測定が終わるまでの数分間で温度や湿度はほとんど変化しない。実験結果の一例を Fig. 4 に示す。同図は対象臭レシピを (Comp 1: 80 % RC, Comp 2: 60 % RC, Comp 3: 40 % RC, Comp 4: 20 % RC) に設定したときの記録結果である。約 150 秒程度で収束し、

Fig. 4. Example of recording smell of apple flavor composed of 4 components.

(a)

(b)

Fig. 5. Influence of humidity change on recording odor. (a) previous method, (b) real-time reference method.

対象臭のレシピ記録が可能になったことがわかった。

次に湿度を変化させたときの実験結果を Fig. 5 に示す。同図 (a) は従来法を用いた場合、同図 (b) は実時間参照方式を用いた場合の結果である。対象臭レシピは Fig. 4 と同じとした。湿度は、キャリヤガス吸込み口付近に乾燥空気を放出した場合から、その空気を水中に通して湿らせたものに切り替えることで、湿度を変化させた。同図 (a) では約 100 秒、同図 (b) では約 200 秒の時点で湿度を切り替えた。これらの時点では湿度変化がない場合にはほぼ収束している。湿度を切り替えたことによる増加湿度は 10 % RH 程度である。

Fig. 5 (a) では敏感に反応して湿度が切り替わると同時に発散した。しかし、Fig. 5 (b) の実時間参照方式では、湿度変化にかかわらずにほぼ対象レシピに収束しており、急激な湿度変化に対してもロバストな匂い記録ができることがわかった。

また、温度を変化させて匂い記録を行った結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) が従来法で同図 (b) が実時間参照方式を用いた場合である。センサが収納されているセンサセルをヒータで加熱することにより、温度変化を生

(a)

(b)

Fig. 6. Influence of temperature change on recording odor. (a) previous method, (b) real-time reference method.

Fig. 7. Result of recording dynamical change in odor under environment of temperature variation.

じさせた。調合臭の匂いレシピがほぼ収束した段階でヒータによる加熱を行い、センサセル内に実装した Ys-CUT 水晶振動子 (10 MHz) で温度変化をモニタした。測定中の温度変化を同図内の点線で示す。Fig. 6(a), (b) の場合ともに 100 秒間に 5℃ 程度上昇させた。

従来法では温度の影響を受けて同図 (a) のように発散したのに対して、実時間参照方式では同図 (b) のように急な温度変化がある場合にも安定して匂い記録することがわかった。

5. 匂いの動的濃度変化の記録

匂いの動的濃度変化の記録は難しい課題の 1 つであるが、実時間参照方式により達成することが可能である。以前は多層パーセプトロンをフィードバック誤差学習法で学習させることによりこの問題に取り組んだが¹⁸⁾、より簡単に実現できる実時間参照方式を用いることにした¹⁹⁾。

Fig. 7 に温度を変えながら対象臭の各要素臭濃度が動的に変わる場合の記録結果を示す。実験装置、方法、サンプルは前節と同じである。対象臭の濃度プロファイルは以下のようなものである。最初は 4 つの要素臭を同時に変化させ、200 秒から 900 秒の間で、Comp 1, Comp 2, Comp 3, Comp 4 の順に 80 % RC から 20 % RC まで減少させた。Fig. 7 では各線が対象臭内の各要素臭の濃度変化であり、プロットが調合臭内の各要素臭濃度変化である。温度は前節と同様にヒータでセンサセルを徐々に加熱し、960 秒間で 12℃ 上昇させた。Fig. 7 では対象臭内と調合臭内の各要素臭濃度の変化が一致し、温度変化があるにもかかわらず匂いの動的変化を記録することが可能となった。

Fig. 8 は湿度変化がある環境下で、Fig. 7 と同様の濃度プロファイルに関して匂い記録を行ったものである。

Fig. 8. Result of recording dynamical change in odor under environment of humidity variation.

湿度を変化させる方法は前節と同じであり、この場合は 13 % RH 程度湿度を上昇させた。同図のように若干記録濃度の変動は増えたが、ほぼ正しく匂い変化を記録することができた。このように、温度や湿度が変動する環境においても、実時間参照方式を用いることにより匂いの動的変化を記録することが可能なことがわかった。

6. ま と め

匂いの記録再生システムの概要を説明し、その 1 手法である実時間参照方式を中心に匂いの記録方法、実験例を紹介した。また、紙面の都合上本稿では述べなかったがこれらの手法は高速化を行うことが可能である^{20, 21)}。今後、さらにこれらの研究を進展させていきたい。

文 献

- 1) 原 昭二, 森 定雄, 花井俊彦: “クロマトグラフィ分離システム” (丸善, 1981).
- 2) 森泉豊栄, 中本高道: “センサ工学” (昭晃堂, 1997).
- 3) 中本高道, 森泉豊栄: 電子情報通信学会論文誌, **82-C-I**, 156 (1999).
- 4) T.C. Pearce, S.S. Schiffman, H.T. Nagle and J.W. Gardner 編: “Handbook of Machine Olfaction” (Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003).
- 5) W.P. Carey, K.R. Beebe, B.R. Kowalski, D.L. Illman and T. Hirschfeld: Analytical Chemistry **58**, 149 (1986).
- 6) T. Nakamoto, S. Utsumi, N. Yamashita and T. Morizumi: Sens. Actuators B **20**, 131 (1994).
- 7) T. Nakamoto, Y. Nakahira, H. Hiramatsu and T. Morizumi: Sens. Actuators B **76**, 465 (2001).
- 8) 中本高道, 山中高夫: 計測自動制御学会誌 **42**, 679 (2003).
- 9) E. Amoore, 原 俊昭訳: “匂い—その分子構造” (恒星社厚生閣, 1972) p. 29.
- 10) S. Skogestad and I. Postlethwaite: “Multivariable Feed-back Control” (Wiley, Chichester, England, 1996) p. 63.
- 11) 田中正吾: “計測システム工学” (朝倉書店, 1994) p.

- 61.
- 12) T. Nakamoto, N. Okazaki and T. Moriizumi: Sens. Actuators B **41**, 183 (1997).
- 13) 中本高道, 森泉豊栄: 日本人工現実感学会誌 **7**, 11 (2002).
- 14) T. Yamanaka, R. Matsumoto and T. Nakamoto: Sens. Actuators B **87**, 457 (2002).
- 15) T. Nakamoto, H. Takigawa and T. Yamanaka: Trans. on IEICE, 2004, **E 87-C**, 2081 (2004).
- 16) 山中高夫, 中本高道: 電学論, **122-E**, 312 (2004).
- 17) T. Yamanaka, R. Matsumoto and T. Nakamoto: Sens. Actuators B **89**, 112 (2003).
- 18) T. Nakamoto and H. Hiramatsu: Sens. Actuators B **85**, 263 (2002).
- 19) T. Yamanaka and T. Nakamoto: Sens. Actuators B **93**, 51 (2003).
- 20) T. Yamanaka, K. Yoshikawa and T. Nakamoto: Sens. Actuators B **99**, 367 (2004).
- 21) N. Nitikarn, 山中高夫, 中本高道: 電気学会E部門総合研究会, 2004, CHS-04-06.