ファジィ推論を用いたガス判別法の提案

青木 徹*・小西 亮介*・木村 壽成*・末次 大祐*

The Proposal of Gas Discrimination by Using Fuzzy Reasoning

Tohru AOKI*, Ryouyusuke KONISHI*, Hisanari KIMURA* and Daisuke SUETSUGU*

We tried gas discrimination by using one semiconductive gas sensor.

As a method of gas discrimination, we used the fuzzy reasoning with fuzzy set of slope of gas pattern which is divided into arbitrary interval.

As a result, we got a good successful rate for hydrogen 66.6%, propane 79.1%, butane 100%, methane 100%, city gas 79.1%, and alcohol 91.6%.

Key Words : gas discrimination, gas sensor, fuzzy reasoning

1. はじめに

最近の研究動向はセンサ回路やその用法によるガス選択性の向上が試みられており特にセンサのインテリジェント化が進んでいる。

われわれもこうしたセンサの知能化の動向に着目し、今まで、接触燃焼式ガスセンサ(セイコー社製)を用いファジィ推論によりガスの判別を行ってきたり、ファジィ理論の応用でのガス判別では石測らのファジィ線形予測法を用いた例もある²⁾。以前われわれが用いたセンサ(接触燃焼式)は濃度に対して出力は比例するが感度が低くブリッジ回路を用いて増幅する必要があった。一方、半導体センサは、接触燃焼式に比べて感度が高くブリッジ回路の必要がないため回路構成が簡略化できる。しかし半導体センサは濃度に対して出力が比例しないなど、以前の方法では使用できない。そこでセンサの複合化を行ううえでの基礎実験として一つのセンサでのガス選択性をもつ方法を考案した。センサ一つで判別を試みたのは、ガス固有の情報を一つのセンサから最大限まで引き出すことにより、今後複数化するうえでの基礎とするためである。今回は半導体ガスセンサ(フィガロ社製, TGS-813) 1個で、6種類の可燃性ガス、水素、ブタン、プロパン、メタン、都市ガス、アルコールについての判

別を試みた。

2. 温度特性の測定

Fig. 1 に示すような測定装置を用いてガスの特性を測定した。ガス導入チャンバーは 2.4 l で、ガスはチャンバーの上部から注射器で導入した。センサの電圧変化をセンサに直列につないだ 10 K Ω の抵抗の電圧としてデジタルマルチメータで読み取り、それを PC-9801 に送り、取り込みデータの処理を行った。

ガス判別の前準備としてセンサの特性の測定では、通常センサの定格ヒータ電圧 (5 V) で使用される。その場合異なるガスを導入しても、センサ感度にそれほどの違いがみられない。しかしガスに対するセンサの温度特性はガス種によって異なっている。そこでセンサに対するヒータの電圧を途中でコンピュータにより自動制御

Fig. 1 Block diagram of measurement system

* 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町南 4-101

* Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori
(Received January 27, 1992)
(Revised May 27, 1992)

で、3 V に切り替えてヒータの温度を変化させ、このときのガスによる応答特性の違いを判別に利用することを試みた。

測定された、各ガスの濃度 1000 ppm. のときの温度変化による特性を Fig. 2 に示す。電圧の切り替えはガスの導入後、5 V の電圧が安定した 40 秒後に行い、そして 3 V に切り替えた後の変化をみたものである。この結果、各ガスによりその特性変化が異なっており、ガスの判別に利用できることがわかった。

たとえば、プロパンガス、ブタンガスの感度は、一度下降したあと上昇した再び下降する特徴をもっている。また、メタンガスは切り替え後は感度が下がり続ける。

都市ガス、水素ガス、アルコールの場合は、切り替えた後は一度下がったあとは上昇を続ける。しかし、ガスの応答の形状と感度電圧が似通っており、センサの感度電圧だけでは、これらのガスを判別することは困難である。またセンサは使用環境に左右されやすく感度にもばらつきを生じてしまう。そのためこのばらつきを配慮したうえで、判別要素となるものを考える必要があった。またその要素はできるだけ単純であれば今後複数化する上で非常に楽になるという考えをもとに判別法を作成した。

3. 判別要素の決定

これらのガスの特性をみて人間が思うことはガスに比べて、「感度が大きく変化した後、少し上昇して、今度は少し減少する」とか「傾きがちょっと下がった」などガスのパターンを具体的な数値ではなく、ばらつきを含んでいても感覚で理解する。これをうまくコンピュータで処理するためにファジィ推論を用いれば良いのではないかと考えられる。

Fig. 2 The characteristics of output voltage of a sensor for six gases at 1000 ppm after the change of heater voltage from 5 V to 3 V

そこで測定した特性から、つぎのような方法を考えた。これらのガスパターンを任意の時間で何点かに区切る。それは適当で良く厳密に何秒後でなくてはならないというわけではない。人間がみて「だいたいこの辺でパターンに変化があるな」と思う点を示してやればよい。このようにして区切った回数が推論回数となる。たとえばガスのパターンを

- 1) 「最初は少し下がって」
- 2) 「つぎにやや上がって」
- 3) 「最後に少し上がる」

と推論回数 3 回で区切ることになる。

n 回区切った時間を $t_1, t_2 \dots t_n$ とすれば、その t_1, t_2 の間の変化分をまず角度に置き換え、その値をメンバーシップ関数に当てはめる。角度に変えたのは人間がみてそのほうがわかりやすいと考えたためである。

まず、測定されたガスのパターンをファイルに記憶しておく。これを利用して Fig. 3(a) に示すような方法で、その選んだパターンについて、決定された時間ごとに角度を計算する。その角度についてメンバーシップ関数により傾きのグレードを求める。求めたグレードを、そのガスと傾きの関係として行列化する。それを全てのガス種、全ての推論時間区分に対して行う。

この推論に使用したメンバーシップ関数を Fig. 3(b) に示す。これは、1 秒間に ± 0.04 V 変化した場合を ± 90 度とし、それから ± 30 度おきに区切った、 ± 0.04 V という値は経験的に得られた値で、センサの 1 秒当りの変化分の最大値である（この値はセンサによって違いがある）。

(a) The transformation to angular value of sensor voltage

(b) Membership functions between $-90^\circ \sim +90^\circ$ for fuzzy reasoning system

Fig. 3

メンバーシップ関数は、NB「大きく負に傾いた」(−90〜−60)、NM「やや負に傾いた」(−90〜−30)、NS「少し負に傾いた」(−60〜0)、ZO「傾いてない(変化ない)」(−30〜+30)、PS「少し正に傾いた」(0〜+60)、PM「やや正に傾いた」(30〜90)、PB「大きく正に傾いた」(60〜90)とした三角形のものをを用いた。

これにより以下のような行列を推論回数分作成する。この行列はガスの特徴をファジィ化したものになり、ガス種を n 種とすれば、

$$\tilde{R}_1 = \begin{matrix} & \text{gas}_1 & \text{gas}_2 & \text{gas}_3 & \cdots & \text{gas}_n \\ \begin{matrix} x_{NB} \\ x_{NM} \\ \vdots \\ x_{PB} \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{1NB} & a_{2NB} & a_{3NB} & \cdots & a_{nNB} \\ a_{1NM} & a_{2NM} & a_{3NM} & \cdots & a_{nNM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1PB} & a_{2PB} & a_{3PB} & \cdots & a_{nPB} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

とおける。行列要素 a の添え字の数字はガス種の番号を、NB, NM, PB はメンバーシップ関数につけられたラベルを示している。

この $\tilde{R}$ は入力

$$\tilde{A}_1 = [x_{NB}, x_{NM}, x_{NS}, x_{ZO}, x_{PS}, x_{PM}, x_{PB}] \quad (2)$$

に対して

$$\tilde{B}_1 = [\text{gas}_1, \text{gas}_2, \cdots, \text{gas}_n] \quad (3)$$

を出力するシステムになる。ここで $\tilde{A}$ はガスの傾き NB から PB までの入力グレード、 $\tilde{B}$ は各ガスの出力グレードとなる。 $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{R}$ の添え字は推論回数を、 x の添え字はメンバーシップ関数のラベルを、そして gas の添え字はガス種の番号を示す。

実験では、ガス導入後センサの電圧をほぼ安定させた、40 秒が経過したのちに、センサ電圧を 5 V から 3 V に自動制御で切り替える。そして決定した時間ごとにセンサ電圧の変化分の角度を計算させる。

計算した値をメンバーシップ関数に当てはめ、NB から PB までのグレードを計算し、入力、 $\tilde{A}$ とあらかじめ作成したファジィ行列 $\tilde{R}$ との合成を行う。それにより出力された値、 $\tilde{B}$ で推論を行う。行列の合成はマックス・ミニム合成を用いた。われわれの実際の推論式は以下のようになる。ガスに対して、水素 1, プロパン 2, …アルコール 6 と番号をつける。いま推論回数 1 回目において、各ガスの出力グレードは

$$\tilde{B}_1 = [\text{hydrogen}_1, \text{propane}_1, \text{butane}_1, \text{methan}_1, \text{city gas}_1, \text{alcohol}_1] \quad (4)$$

となる。ガス名につけられた添え字は推論回数を示している。それぞれの値は

$$\tilde{B}_1 = \tilde{A}_1 \circ \tilde{R}_1 \quad (5)$$

により求められる。

$\tilde{B}_1$ のそれぞれは

$$\begin{aligned} \text{hydrogen}_1 &= (x_{NB} \cap a_{1NB}) \cup (x_{NM} \cap a_{1NM}) \\ &\quad \cup \cdots \cup (x_{PB} \cap a_{1PB}) \\ \text{propane}_1 &= (x_{NB} \cap a_{2NB}) \cup (x_{NM} \cap a_{2NM}) \\ &\quad \cup \cdots \cup (x_{PB} \cap a_{2PB}) \\ \text{alcohol}_1 &= (x_{NB} \cap a_{6NB}) \cup (x_{NM} \cap a_{6NM}) \\ &\quad \cup \cdots \cup (x_{PB} \cap a_{6PB}) \end{aligned} \quad (6)$$

と計算される。 a の添え字はガス種の番号を示している。

そして 1 回目の推論が終われば、推論結果 $\tilde{B}_1$ とつぎの推論結果 $\tilde{B}_2$ をもとめ、それぞれのガス別のミニムをとる、ガスのグレードを決定する。たとえば水素なら

$$\text{hydrogen} = \text{hydrogen}_1 \cap \text{hydrogen}_2 \quad (7)$$

これを行列要素ごとに行い、

$$\text{GAS} = (\tilde{B}_1 \cap \tilde{B}_2) \quad (8)$$

となる。ここで GAS は、ガスのファジィ集合である。

そのとき、各ガスのグレードがある値より小さくなればそのガスではないとして推論の対象から除外しそのガスのグレードを 0 とする (今回は除外のガスグレードを 0.01 以下として計算を行った。この値は推論を正しく行ううえで、影響をほとんど与えていないと思われる。この値を大きくすれば単純に推論回数は減少するが誤判別割合も多くなるであろう)。

これを繰り返す、もしも設定した推論回数よりも前にガス種を一つに決定できればそこで推論を終了する。

最終的に何種類かのガスが残った場合、その中でグレードのマックスを取り、ガス種を決定する。推論回数を n とすれば、

$$\text{GAS} = \cup (\tilde{B}_1 \cap \tilde{B}_2 \cap \cdots \tilde{B}_n) \quad (9)$$

となる。

このような方法で、各ガスについて判別実験を行った。推論回数は 8 回とした。

4. 実験および結果検討

コンピュータに測定電圧を取り込み計算させ、その後、判別プログラムによりどのガスかを決定した。

6 種のガスの判別率と平均推論回数を Table 1 に示す。各ガスについて 24 回ずつ実験した結果である。これを見る限りではほぼ良い結果ではあるが、判別率から見ると水素ガスについては 66% ときわめて判別率の低い値となった。誤判別ガスは都市ガスとアルコールで、誤判別について検討するために推論の際のグレードの変化を示す。

Fig. 4(a) はメタン、(b) はプロパン、(c) はブタン、(d) は水素、(e) は都市ガス、(f) はアルコールの推論の際のグレード変化を示している。これは各ガスについて推論 24 回の平均である。平均すればどのガスについても目的とするガスのグレードが一番大きくなっており、

Table 1 Results of gas discrimination

Gas name	Number of data	Number of fault	Successful rate(%)	Reasoning time(Av.)	Gas name of an error in discrimination
hydrogen	24	8	66.6	8	Alcohol, City gas
propane	24	5	79.1	3.04	Butane
butane	24	0	100	4.78	—
methane	24	0	100	2	—
city gas	24	5	79.1	8	Hydrogen, Alcohol
alcohol	24	2	91.6	5.5	Hydrogen, City gas

(a) Methane

(d) Hydrogen

(b) Propane

(e) City gas

(c) Butane

(f) Alcohol

Fig. 4 The gas grade of each reasoning time on the average of 24 times measurement

推論方法に問題はないと思われる。水素、都市ガスは平均推論回数 8 回である。ここで推論回数 5 回目以降はほとんどグレードに変化がない。この結果は、推論回数を細かくしても特徴のない部分は推論の対象とならないことをしめしている。今後はこの点に留意する必要がある。各ガス別にみると以下のような結果である。

メタン；最少推論回数 2 回で判別を行ったのはメタンガスで、これはほかのガスに比べて特徴的であり、5 V から 3 V に切り替えた後一定して感度が減少する。このため推論 2 回目ですでにほかのガスと異なっており判別は容易であった。

プロパン；プロパンの特徴は感度上昇後の減少の時間がブタンガスより若干速く、その部分が推論 3 回目に当たる時間である。その特徴をとらえて判別したと思われる。

ブタン；ブタンガスはそのパターンの形状はプロパンと似ている。センサ感度の変化では上昇後、減少する。減少する時間はプロパンより遅いが、水素、都市ガス、アルコールはその時間では減少をすることはない。そのためほぼ推論 4 回目に当たる時間でガス判別を行ったと思われる。

アルコール；アルコールの場合、高濃度では、決定的に上昇率が変わっている部分がありそれが推論 4 回目の時間である。そこでアルコールのグレードが決定的に大きくなっている。そのためこの部分で判別を終了したのもあり、平均推論回数は 5.5 回となっている。低濃度ではガスのパターンが水素、都市ガスと類似しており推論は 8 回まで行われた。

水素；水素ガスはアルコール、都市ガスと形状は良く似ているが、その感度の上昇の具合が若干異なっている。その上昇の具合を捕らえて判別していると思われる。ただ、決定的な特徴に乏しく推論は最後まで行われている。水素の誤判別ガスはアルコールと都市ガスで、この原因はアルコールのパターンのうち低濃度のものは、水素ガスのパターンを少し強調したような形になっており、水素のパターンをアルコールのパターンに誤判別したと考えられる。

都市ガス；都市ガスについては、都市ガスの 40% の成分が水素ガスであり、もともとのパターンが酷似しているのでもともと判別は難しかった。判別できたのはほかの成分の影響がでたのではないかと推測している。この結果を以前の方法¹⁾と比較して、水素ガスの判別率は同程度(66.6%)であり、都市ガスに関しては、50.0%から 79.1%へ向上しており改良されている。さらに判別率を向上させるためには異なった特性をもつセンサを組み合わせ判別することが必要と思われる。

Fig. 4 の推論のグレードの変化をみたとき、目的とするガス以外にグレードが大きくでたガス種が存在することがわかる。これは単純にガスのパターンが似ているためである。これをガスパターンのグループとして考え、相互誤判別ガスを考慮すればプロパン・ブタンを一つのグループ、水素・都市ガス・アルコールを一つのグループ、メタンのグループに分けられる。グループの識別後、グループ別にフィードバックを行い、ヒータ温度を微妙に制御することで、類似パターンのガス判別率を向上させることは可能ではないかと思われるが、今後の課題である。

そのほか誤判別の要因として、時間区分の与え方によるものも大きい。任意に感覚で選べるという利点を考えると、この結果はまずまずではないかといえる。ただ、変化のないところを選んでしまつては判別の要素にはならない。特徴的な範囲を自動的に範囲を選択するようにすれば、人間の手を加える必要はなく、判別率が安定、向上するのではないかと考えられる。

選択するガスパターンであるが、類似ガスのパターンに関してはセンサの特性に依存しており別のセンサを利用して、その類似ガスに対応できるようにすることで判別率は向上するだろうと考えている。

今回の 6 種類のガスの判別では、濃度を考慮せずにガス種の判別のみを目的として行った。濃度についてはガス種の決定後センサの濃度に対する感度曲線により求めることが出来ると考えている。

今回行った実験ではセンサのデータ範囲がある範囲内であれば十分有効であるが、繰り返し実験を行っていくうえで、センサ出力に変動があり、データのばらつきが許容範囲を越えた場合では判別失敗が多かった。

5. ま と め

本論文ではファジィ推論を用いたガス判別法の提案を行った。ヒータ電圧を制御してガスの特徴を抽出する。そして各ガスの応答パターンを時間的に分割し、分割した時間でのパターンの傾きをファジィ化する。そして行列を作成し、任意の入力と比較しながら推論を行う方法である。この方法を用いて実験を行った結果、6 種類のガスパターンについて特徴的な時間を選び出し、ファジィ行列の作成を行い、それによりガス判別を行うことができた。

6 種類のガスについて、水素 66.6%、プロパン 79.1%、ブタン 100%、メタン 100%、都市ガス 79.1%、アルコール 91.6%という良い判別率を得ることが出来た。

今回のシステムは単純で、ガスの特徴を抽出するための計算量も少ない。また逐次的に判別を行っているため、

パターンデータ全てを必要とせず、推論途中の早い時間でガス判別が可能な場合、そこで処理を終了する。また判別困難な場合はさらに同様の処理を行い推論を繰り返すという単純な構造である。

またガスの特性はヒータの温度特性に依存することがわかっている。センサを複合化する場合も同様な処理を全てのセンサに行えば良いと考えられる。

6. おわりに

今回の結果から、センサ1個で判別可能なガス種が多ければ複数化した場合、単純に考えて N 個のセンサなら、1個の場合の N 倍のガスを判別することが可能ではないかと考えられる。1個でできるだけ判別法を単純化しておけばセンサを複数化しても全体のシステムを簡略化できる利点がある。またヒータの温度によりガスの特徴を抽出することができるので、今後は現在の判別システムを、濃度推定、成分分析なども扱えるように発展させる必要があると考えている。

参考文献

- 1) 竹歳, 小林, 小西, 笹倉: Fuzzy 理論を用いたガス判別, 計測自動制御学会論文集, 27-5, 503/508 (1991)
- 2) 石淵, 田中, 福岡: ファジィデータの判別分析とガスセンサシステムへの応用, 日本ファジィ学会誌, 1.1-1, 117/131 (1989)

[著者紹介]

青木 徹

1991年, 鳥取大学工学部電子工学科卒業。同年同大学大学院修士課程入学。ガスセンサシステムに関する研究に従事。

小西 亮介 (正会員)

1968年, 神戸大学工学部計測工学科卒業。70年同大学大学院修士課程修了。同年鳥取大学電子工学科助手, 77年同助教授となり, 現在に至る。薄膜・表面物理・マイクロコンピュータの計測への応用に関する研究に従事 (工学博士)。

木村 壽成

1992年, 鳥取大学工学部電子工学科卒業。同年富士通九州デジタルテクノロジーに入社。

末次 大祐

1992年, 鳥取大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機エンジニアリングに入社。