

Les micro-systèmes : technologies et traitement de l'information associé pour quelques applications.

Pierre Puget, Philippe Nerin

CEA- LETI, Département Systèmes,
CEA-G, 17, rue des Martyrs
F 38054 GRENOBLE Cedex 9, France

RESUME

Les micro-systèmes représentent une nouvelle forme de systèmes possédant des qualités uniques en particulier de miniaturisation et de faible coût rendues possibles par les progrès des micro-technologies mises au point pour la réalisation de circuits intégrés. Dans cet article nous nous attachons à passer en revue les grandes familles de micro-capteurs et à mettre en évidence les traitements de l'information associés à chacun d'eux.

1. Introduction

Un micro-système est avant tout un "système" : il est conçu pour assurer un certain nombre de fonctions telles que perception de l'environnement (capteur), analyse et traitement des données recueillies, prise de décision, communication avec le monde extérieur, ou action sur l'environnement

Il est "micro" par sa dimension technologique importante. En effet la fabrication d'un micro-système repose sur les notions fondamentales d'intégration spatiale, de fabrication et d'assemblage collectifs des différents éléments du produit final. Les technologies de fabrication sont plus ou moins toutes dérivées de celles mises au point pour la réalisation de circuits de la micro-électronique.

L'utilisation de ces technologies confèrent aux micro-systèmes des avantages fondamentaux suivant :

- miniaturisation,
- coût réduit par les procédés de fabrication *collective* (mise en oeuvre de chaque étape technologique sur un grand nombre d'éléments présents sur une même tranche de silicium ou d'un autre substrat) et la miniaturisation,
- performances et fonctionnalités nouvelles,
- économies d'énergie.

L'objectif de cet article étant de présenter les problèmes de traitement de l'information liés aux micro-systèmes, nous n'avons pas cherché à couvrir de façon exhaustive le domaine. Nous avons retenu les exemples qui d'une part présentent un réel potentiel en termes d'applications "industrielles", d'autre part qui offrent au "traiteur du signal" des problèmes intéressants. C'est pourquoi nous ne considérerons déjà que les micro-systèmes qui sont des *capteurs*[1][2], et nous écartons d'emblée les micro-actuateurs, qui, à notre sens, ne présentent pas le même intérêt d'un point de vue traitement.

Le traitement mis en oeuvre dans un système dépend à la fois de l'application, sous ses aspects traitement "haut niveau", et du principe physique mis en oeuvre dans la mesure, sous les aspects traitement "bas-niveau". C'est

ABSTRACT

Micro-systems represent new kinds of systems that exhibit unique qualities, especially in terms of reduced size and low cost. These qualities are possible due to the progress made in the micro-technologies developed for manufacturing integrated circuits. In this article, we review the different kinds of micro-sensors and focus on the data processing methods attached to each of them.

pourquoi, nous avons regroupé les capteurs suivant le principe physique mis en oeuvre dans la mesure. C'est ainsi que le paragraphe 2 traite des micro-capteurs reposant sur la mesure d'une déformation du matériau, ce qui permet la réalisation de micro-capteurs mécaniques. Le paragraphe 3 suivant a pour objet les capteurs mesurant l'intensité d'une réaction chimique en surface du matériau, ce qui permet la détection et la mesure de concentration d'espèces chimiques, en particulier de gaz. Le paragraphe 4 donne quelques exemples de micro-systèmes exploitant les propriétés de propagation de la lumière.

Dans le cadre de cette présentation, nous avons laissé de coté les "rétines artificielles" qui sont pourtant de beaux exemples de micro-systèmes, implantant simultanément des fonction de détection et de traitement d'image. Nous avons estimé qu'ils ne présentaient pas suffisamment de spécificité par rapport au "macro-système" classique, et que ce domaine était suffisamment connu de la communauté du traitement du signal et des images.

2. Les micro-capteurs mécaniques

Le silicium qui est le matériau de base pour la réalisation de la plupart des circuits en micro-électronique a, outre ses qualités de semi-conducteur, des propriétés mécaniques intéressantes (en termes d'élasticité, résistance, etc.). De plus, les technologies de micro-usinage du silicium permettent la réalisation de structures mécaniques de dimensions de l'ordre de quelques microns à quelques millimètres, tels que poutres, membranes, etc.

Le silicium dopé a des propriétés également de piezo-résistivité qui permet de réaliser par des étapes technologiques classiques, par exemple des jauges de contraintes pour la mesure des déformations.

Des solutions existent pour actionner ces structures mécaniques, ou plutôt les exciter, par exemple pour réaliser des structures oscillantes. Cette excitation peut se faire par action électrostatique entre deux peignes interdigités ou de deux membranes. Elle peut se faire aussi par chauffage par effet Joule, très local et modulé dans le temps.

Ces possibilités permettent ainsi de réaliser des capteurs de pression et des accéléromètres en mesurant la déformation de poutres ou de membranes par la mesure de la résistance variables de jauges de contraintes (effet piezo-résistif).

D'autres capteurs de pression sont réalisés en mesurant la déformation d'une membrane par mesure capacitive.

D'autres capteurs exploitent la mesure des perturbations d'un oscillateur harmonique entretenu pour estimer des accélérations, des pression, ou des rotations (mesure d'une force de Coriolis pour réaliser un gyromètre).

D'un point de vue traitement, il s'agit le plus souvent de compenser les dérives dues à la température, de calibrer les capteurs après fabrication, ou d'asservir des oscillateurs.

Pour certaines applications, en particulier pour le déclenchement d'un air-bag à partir d'un signal délivré par un accéléromètre, une étape de reconnaissance de forme est nécessaire pour déclencher à bon escient: un simple seuillage est insuffisant.

3. Les micro-capteurs chimiques

3.1. Principes physiques et grandeurs mesurées

La grande majorité des capteurs chimiques [3] exploitent les phénomènes d'adsorption ou d'absorption de molécules, atomes ou ions, et les modifications des propriétés électriques qui s'ensuivent : variation de la conductivité, du potentiel de surface ou de la permittivité. On peut citer à titre d'exemples :

- les gaz réducteurs sont adsorbés et oxydés lorsqu'ils entrent en contact avec un film d'oxyde de zinc, d'étain, de zirconium ou de titane, maintenu à haute température par effet Joule. Il s'ensuit une modification de la conductance du film d'oxyde [4]. L'ajout de métaux précieux agissant comme catalyseurs permet d'augmenter cet effet et d'améliorer la sélectivité du capteur. Cependant c'est ce manque de sélectivité qui semble aujourd'hui être l'inconvénient majeur de ce type de capteur,
- certains polymères conducteurs présentent des propriétés similaires: une variation de la résistivité d'un film déposé sur un substrat, ou une variation d'une capacité traduit l'adsorption de certaines molécules de gaz [5].

Pour d'autres capteurs chimiques, l'adsorption de molécules créent une modification des caractéristiques mécaniques d'un oscillateur [14] ou d'une membrane, mesurée par les modifications des conditions de propagation d'ondes acoustiques de surface [6,7]. D'autres encore sont fondés sur la mesure de la chaleur dégagée par une réaction d'oxydo-réduction catalysée en surface du capteur [8].

Les capteurs cités précédemment souffrent tous, à des degrés divers, d'un certain nombre d'inconvénients qui rendent pratiquement inexploitable les signaux bruts :

- un capteur donné a une réponse qui dépend de la nature du gaz, et de sa concentration ou pression partielle, cette réponse est souvent non linéaire. Elle dépend aussi d'autres paramètres, et en particulier souvent de la température,

- ces capteurs ne sont en général pas spécifiques, c'est à dire qu'il réagiront à la présence de plusieurs gaz. Pour de nombreuses applications, on est cependant intéressé par la mesure de la pression partielle d'un ou de quelques gaz bien spécifiques.

- les réactions chimiques de surface ont une cinétique parfois lente qui impliquent pour les capteurs des temps de réponse faibles, ainsi que parfois des hystérésis et des dérives.

La dépendance de la réponse par rapport à la température peut être exploitée pour résoudre le problème de spécificité. Par exemple, la réponse de certains capteurs à filament catalytique dépend, pour un gaz donné, de la température du filament. La mesure de la réponse d'un seul capteur à différentes températures ou la modulation de la température peuvent permettre de déterminer la composition d'un mélange gazeux [9,10].

Les différences de cinétiques chimiques en fonction des espèces peuvent être également exploitées pour augmenter la spécificité des capteurs. Par exemple dans [11], le signal fourni par le capteur est une tension variant dans le temps suivant une loi exponentielle, similaire à la charge d'une capacité. Les deux grandeurs utilisées pour la détermination de la nature d'un gaz et sa concentration sont la dérivée temporelle du signal au temps $t=0$ et la valeur de la tension à un instant t_1 fixé.

3.2. Schéma général de traitement

Dans une application donnée, on est en général intéressé pour mesurer la concentration d'un ou de n gaz donnés, dans un volume pouvant contenir a priori p gaz différents, avec p supérieur à n . Du fait de leur manque de spécificité, les capteurs pouvant être utilisés ont toutes les chances de réagir à tous les p gaz présents. Il faudra donc concevoir un système capable de mesurer finalement les concentrations de p gaz différents, même si on ne s'intéresse qu'à un nombre plus restreint de ceux-ci. Il faudra disposer, pour pouvoir calculer p pressions partielles, soit de p capteurs différents, soit pour certains des capteurs, mesurer plusieurs grandeurs indépendantes (comme par exemple précédemment une réponse et la dérivée temporelle de celle-ci à un instant donné), ou les faire opérer dans des conditions différentes (de température par exemple) pour pouvoir en obtenir également des mesures indépendantes. D'un point de vue technologique, la juxtaposition de plusieurs capteurs différents sur un même substrat ne pose en général aucun problème.

Prétraitement

La première étape de traitement de ces p grandeurs indépendantes est généralement un prétraitement qui peut être :

- la soustraction d'une composante continue ("offset")
- un moyennage temporel ou une autre opération de filtrage
- une transformation pour linéariser le problème: par exemple pour certains capteurs, on sait que le signal varie comme la racine carrée de la pression partielle: on s'intéressera donc par la suite au carré du signal brut.

Reconnaissance de formes

L'étape ultérieure de traitement consiste, la plupart du temps, à comparer de façon plus ou moins sophistiquée les signaux prétraités avec leurs équivalents obtenus lors d'une étape de calibration où l'ensemble des capteurs a fonctionné pour des mélanges de gaz connus ayant des concentrations différentes. Des méthodes classiques de reconnaissance de formes sont utilisées[3] : régression linéaire, régression en composantes principales, plus proche voisin par exemple. Un grand intérêt pour les réseaux de neurones artificiels[12] semble avoir vu le jour dans la communauté scientifique. Un des grands intérêts des réseaux de neurones est leur capacité à résoudre des problèmes non linéaires. Le prétraitement des données brutes ne se justifie ainsi parfois plus. Des applications de reconnaissance d'odeurs ont été mises au point, utilisant les réseaux de neurones pour, par exemple, déterminer le niveau de fraîcheur d'aliments[13], reconnaître des boissons alcoolisées[14], reconnaître des variétés de café[15].

4. Les micro-capteurs optiques

Les capteurs optiques exploitent les propriétés de propagation et d'interaction de la lumière avec différents milieux. Nous nous intéressons ici aux capteurs pour lesquels une onde lumineuse visible ou infrarouge est émise (sous forme d'impulsions, d'onde continue d'amplitude constante ou non), qui se propage, en général dans l'air, interagit avec une cible (en général est rétro-diffusée à sa surface), et dont une fraction revient au capteur sous forme d'une onde de retour. L'onde est émise par un laser pour les propriétés de faible dimension du faisceau et de faible diffraction. L'information donnée par le capteur est portée par cette onde de retour. Cela peut être:

- le temps de vol entre le départ de l'onde lumineuse et son retour, ou son déphasage: on pourra alors mesurer la distance entre le capteur et la cible. On parlera de *télémètre optique*,
- l'amplitude ou la puissance de l'onde de retour. On sera alors renseigné sur la nature de la cible ou le milieu de propagation. Dans ce dernier cas, on pourra faire de la *détection optique de gaz* [16],
- la longueur d'onde de la lumière réfléchi. On sera alors capable de mesurer par exemple un décalage Doppler pour mesurer la vitesse de la cible. On parlera de *vélocimétrie optique*.

Les progrès des micro-technologies autorisent aujourd'hui la réalisation des composants nécessaires à la réalisation de tels micro-systèmes :

- les sources que sont les diodes laser, et les micro-laser solides,
- les détecteurs semi-conducteurs miniaturisés,
- les composants d'optique, éventuellement intégrée,
- les technologies de micro-assemblage.

Ces systèmes de télédétection sont dénommés habituellement "LIDARS" (Light Detection And Ranging). Ils diffèrent par leur principe de détection, ce qui, à la fois leur ouvre des applications potentielles différentes, et entraîne des besoins en traitement distincts. Remarquons que plusieurs des principes exposés ci-dessous présentent une

grande similarité avec ceux mis en oeuvre dans les radars. La spécificité et la difficulté vient de la fréquence de l'onde électromagnétique porteuse, ici de l'ordre de 300 Thz (pour une longueur d'onde de 1µm).

4.1. Détection incohérente

La détection incohérente n'exploite que la puissance de l'onde lumineuse de retour, et ne tient pas compte en particulier de sa phase optique.

Une première famille de télémètres optiques mesure le temps de vol d'une impulsion, dont le front se doit d'être le plus raide possible (pour une bonne précision de la mesure), dont la puissance crête est la plus forte possible (pour avoir un bon rapport signal sur bruit sur le détecteur)[17]. Les points les plus délicats du traitement résident dans la détection de l'impulsion de retour et la mesure précise du temps de vol. Une précision de l'ordre de 10 cm de la distance mesurée correspond à une précision de l'ordre de 600 ps sur le temps de vol. La mesure du temps de vol peut se faire en associant le comptage d'une horloge à une interpolation qui consiste à mesurer le niveau d'une rampe de tension[18]. Le LETI a développé un circuit intégré sur lequel est implanté le traitement complet.

La brièveté des impulsions (de l'ordre d'une nano-seconde) rend difficile un échantillonnage et la mise en oeuvre d'algorithmes de traitement très sophistiqués. Cependant, si on peut émettre un train d'impulsion dont on contrôle éventuellement la forme, il est possible d'améliorer la précision en moyennant les mesures de temps de vol (possible si le rapport signal sur bruit est suffisant pour avoir une mesure pour chaque impulsion), en accumulant les signaux avant détection de l'impulsion et estimation du temps de vol, ou encore en corrélant le signal de retour avec la forme du train d'impulsion émis. Cette méthode est particulièrement intéressante si le rapport signal sur bruit ne permet pas la détection d'une impulsion élémentaire isolée, mais elle est évidemment beaucoup plus complexe à mettre en oeuvre.

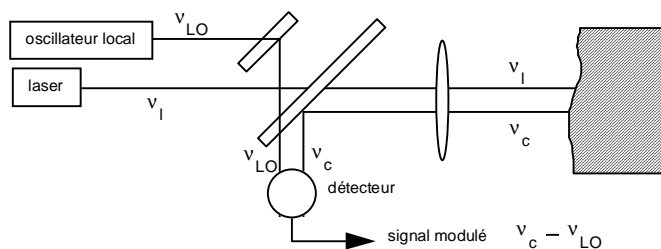
Pour d'autres types de télémètres, on module l'amplitude de l'onde émise. La mesure du déphasage entre les ondes émises et réfléchies donne la longueur du chemin optique parcouru par l'onde lumineuse[19]. Pour avoir une bonne précision et éviter les ambiguïtés dues à un déphasage supérieur à 2π , il est possible de moduler l'amplitude avec plusieurs harmoniques.

4.2. Détection cohérente

La détection cohérente exploite les informations d'amplitude et de phase optique de l'onde de retour. Les phénomènes suivants sont susceptibles de conditionner la forme de l'onde de retour:

- l'amplitude a été atténuée par la propagation dans l'air et la rétrodiffusion sur la cible
- la phase a changé du fait de la propagation
- la fréquence a pu être modifiée par effet Doppler si la cible est en mouvement

Plusieurs schémas de détection sont possibles[20]. Ils sont tous semblables à celui de la figure ci-dessous.



Le principe est de faire interférer au niveau du détecteur l'onde rétrodiffusée par la cible et une onde produite par un oscillateur local de fréquence proche de la précédente. Le signal délivré par le détecteur est alors un signal modulé à la fréquence de battement, différence des deux fréquences. L'oscillateur local peut être un second laser (détection dite hétérodyne), ou peut consister dans un prélèvement d'une partie de l'onde émise et renvoyée sur le détecteur, avec éventuellement un décalage préalable en fréquence (détection dite homodyne). Suivant les cas, on pourra mesurer la distance de la cible, sa vitesse, ou bien les deux à la fois. Un cas particulier est un interféromètre de Michelson qui a donné lieu au LETI à une réalisation totalement intégrée, ce qui permet de mesurer un déplacement de la cible par comptage franges[21]. Une autre réalisation exploite un schéma de détection homodyne ou la fréquence du laser est modulée dans le temps, ce qui permet une mesure simultanée de distance et vitesse[20].

D'un point de vue traitement de signal, l'étape la plus importante est en général l'estimation de la fréquence du battement du photocourant issu du détecteur. A la modulation intéressante se superpose en général un bruit venant de la source qui peut être important mais généralement localisé dans une bande spectrale connue.

5. Conclusion

Les micro-systèmes, en particulier les micro-capteurs, par les potentialités qu'ils offrent et les progrès permis par les micro-technologies seront amenés à un développement certain. Les problèmes de traitement qu'ils posent, en général sont similaires à ceux rencontrés pour leurs homologues macroscopiques. Cependant, leurs dimensions réduites et les contraintes apportées par la technologie leur donnent parfois une certaine spécificité. De plus, il faut souligner que les avantages des micro-systèmes ne seront pleinement exploités que si l'électronique de traitement est elle-même fortement intégrée.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Pascal Besesty, Jean-Frédéric Clerc, Dominique Derou, Claude Vauchier, pour leur aide, en particulier pour la fourniture de documents.

7. Références

- [1] Gardner J.W. "Microsensors, principles and applications", Wiley 1994.
 [2] Sze S.M. "Semiconductor Sensors", Wiley 1994.

[3] Göpel W., Hesse J., Zemel J.N. "Sensors, a comprehensive survey vol 2", VCH Publishers, 1991.

[4] Corcoran P., Shurmer H.V. et Gardner J.Z. "Ingrated tin oxide sensors of low power consumption for use in gas and odour detection", Sensors and Actuators B, 15-16,32-57,1993.

[5] Miasik J.J., Hooper A. et Tofield B.C., "conducting gas sensors", J. Chem. Soc. Trans., 1(82), 1117-1126, 1986.

[6] Wohltjen H. "Mechanisms of operation and design considerations for surface acoustic wave device vapour sensors", Sensors and Actuators, 5, 307-325, 1984.

[7] Fox C.G. and Alder J.F. "Surface acoustic wave sensors for atmospheric gas monitoring", Techniques and Mechanisms in Gas Sensing, pp325-345 (édité par P.T. Moseley et al.), Adam Hilger, 1992.

[8] Riegel J. et Hårdtl K.H. "Analysis of combustible gases in air with calorimetric gas sensor based on semiconducting BaTiO₃ ceramics", Proceedings of 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '89) and Eurosensors III, Montreux, Suisse, 1989.

[9] Otawaga T., Stetter J.R. "A Chemical Concentration Modulation Sensor for Selective Detection of Airborne Chemicals", Sensors and Actuators 11, 251-264, 1987.

[10] Maclay G.J., Stetter J.R., Christesen S. "Use of Time-dependant Chemical Sensors Signals for Selective Identification", Sensors and Actuators 20, 277-285, 1989.

[11] Müller R. et Lange E., "Multidimensional Sensor for Gas Analysis", Sensors and Actuators 9, 39-48, 1986.

[12] Bishop C., "Neural Networks for Pattern Recognition", Clarendon Press, Oxford, UK, 1995.

[13] Lee D.H., Payne J.S., Byun H.G., Persaud K.C., "Application of RBF neural networks to odour sensing using a broad specificity array of conducting polymers", ICANN'96, Bochum, Germany, 1996.

[14] Nakamoto T., et al. "Identification Capability of Odor Sensing Using Quartz Resonator Array and Neural Network Pattern Recognition", Sensors and Actuators B1, 473-476, 1989.

[15] Gardner J.W., Shurmer H.V., et Tan T.T., "Application of an electronic nose to the discrimination of coffees", Sensors and Actuators B, 6, 71-75, 1992.

[16] V. Weldon, et al., "H₂S and CO₂ gas sensing using DFB laser diodes emitting at 1,57 μm", Sensors and Actuators B 29, 1995, p. 101-107.

[17] L. Fulbert, et al. "Microchip laser range finder", proceedings de CLEO/ QELS'96 (USA).

[18] P. Besesty, "ALIS: Advanced Laser Imaging System", Communication SEE Annecy, Les capteurs intelligents du concept aux applications industrielles, 1991.

[19] V.V. Yakovlev, "High-precision laser range finder and laser for industrial use", Sov. J. Opt. Tech. (10), Oct. 1993 p 218-222

[20] Philippe Nerin, "Etude d'un système de télémétrie et de vélocimétrie laser utilisant un micro-laser Nd:YAG-LiTaO₃ en mode autodyne", Thèse de l'INPG, 1997.

[21] J. Lizet, "Circuit intégré pour la mesure en interférométrie", RGE 10, 1990, p. 109-117