

Capteurs inertiels à base de MEMS

Dimitri Galayko

1

Sommaire

- Principe de fonctionnement des capteurs inertiels
- Composantes des capteurs inertiels:
 - Résonateurs
 - Transducteurs
 - Interfaces électriques
- Présentation du mini-projet « conception d'accéléromètre »

2

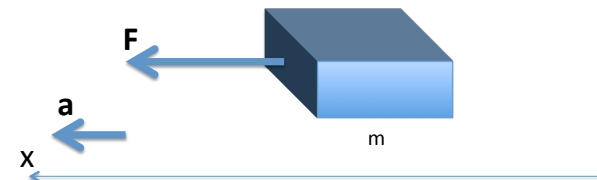
Principe de capteur inertiel

- Les capteurs inertiels caractérisent des phénomènes liés à déplacement à vitesse variable (accélération) et à la gravitation.
- Exemple : accéléromètre (voiture, avion...), gyroscope (orientation du vecteur de champ gravitationnel)
- Au cœur de capteur inertiel : une masse

3

Principe de capteur inertiel

- Une masse : une source de la force d'entrée

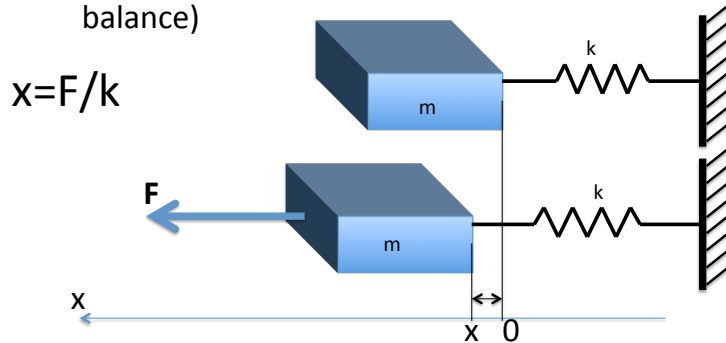


- Capteur de gravitation: $\mathbf{F} = m\mathbf{g}$
- Capteur d'accélération : $\mathbf{F} = -m\mathbf{a}$
- **Les capteurs inertiels mesurent la force $\mathbf{F}$**

4

Principe de capteur inertiel

- Comment mesurer une force ?
 - L'associer à un ressort
 - Mesurer la déformation du ressort (principe d'une balance)



5

Principe de capteur inertiel

- Bruit dans les accéléromètres: limites physiques à la resolution
- Dans une bande de 1 Hz, le r.m.s. de la force de bruit: $F_n = \sqrt{4k_b T \mu}$

- Pour l'accélération:

$$a_{n,rms} = \sqrt{\frac{4k_b T \omega_0}{mQ}}$$

- $f_0 = 23.7$ kHz, $m = 2.2 \times 10^{-10}$ kg, $Q = 5$:

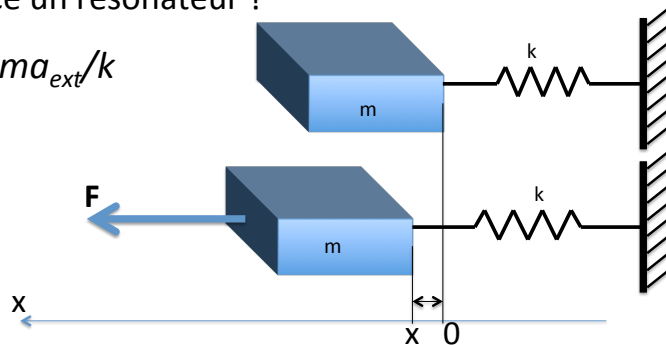
$$a_{n,rms} = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 \text{ ou } 0.5 \text{ mg/Hz}^{1/2}$$

7

Principe de capteur inertiel

- Est-ce un résonateur ?

$$x = F/k = ma_{ext}/k$$



- Oui ! Sachant que $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, on a $x = a_{ext}/\omega_0^2$
- Plus ω_0 est grand, plus x est petit

6

Principe du capteur inertiel

- Il s'agit donc de mesurer le déplacement !
- Lien entre le déplacement et l'accélération ?
La loi de Newton écrite dans le repère lié au support de la masse mobile (x sur le transp. précédent)

$$-kx - \mu \dot{x} + F = m\ddot{x}, \text{ où } F = -ma_{ext} \text{ ou } F = mg$$

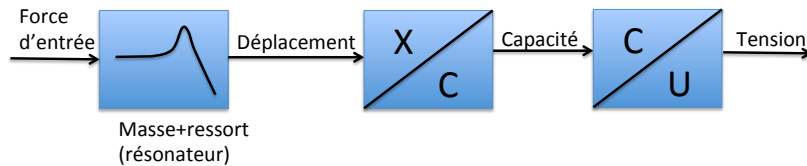
- Dans le domaine de Laplace:

$$\frac{x(p)}{F(p)} = \frac{1}{k + \mu p + mp^2},$$

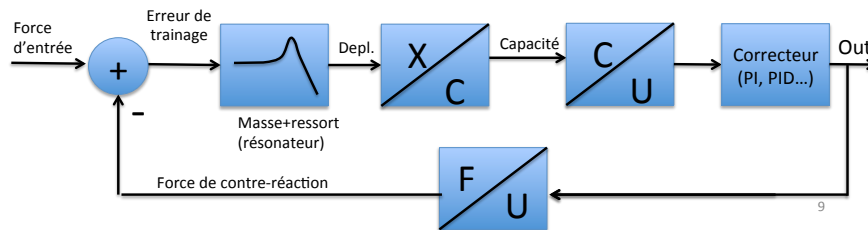
8

Principe du capteur inertiel

- Schéma en boucle ouverte :



- Schéma en boucle fermée :



9

Principe du capteur inertiel

- Conversion « position-tension » : capacitive ou piézoélectrique
- Nombreuses techniques de mesure de la capacité – cf. plus loin
- Boucle ouverte ou boucle fermée ? Boucle fermée ! Pourquoi ?
 - Tous les bienfaits de systèmes en boucle fermée – amélioration de la linéarité, de la bande passante, de la stabilité
 - Système plus complexe, car nécessite une transduction « tension-force », mais naturellement faisable avec MEMS.

10

Mesure de la position

- Choix du transducteur capacitif : $c(x)$ est linéaire/non-linéaire

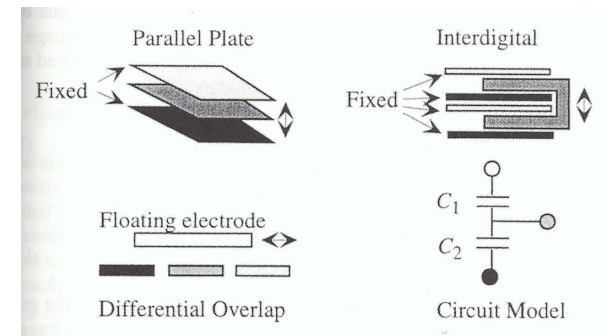


- Choix de la mesure différentielle/unipolaire

11

Mesure de la position

- Choix de la mesure différentielle/unipolaire

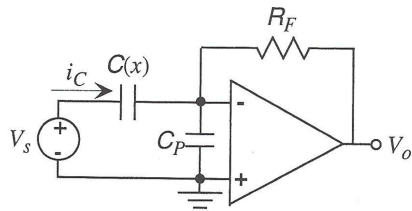


- Technique de la mesure de la capacité ?

12

Mesure de la position

- Mesure de capacité « unipolaire » : amplificateur de transimpédance

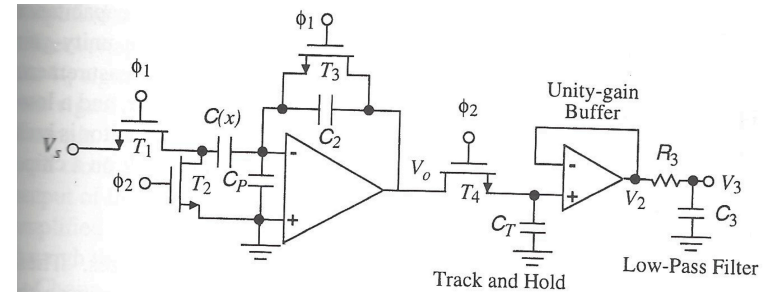


- On mesure la vitesse et non pas la position si V_s est une source DC!

13

Mesure de la position

- Mesure de capacité « unipolaire » : capacités commutées

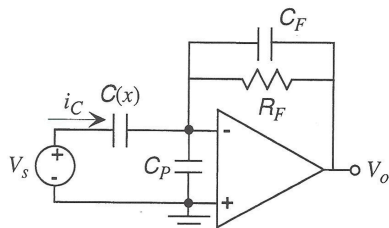


- Φ_1, Φ_2 : les horloges en opposition de phase
- Mesure directe de la capacité ! Insensible à la capacité parasite

15

Mesure de la position

- Mesure de capacité « unipolaire » : amplificateur de transimpédance

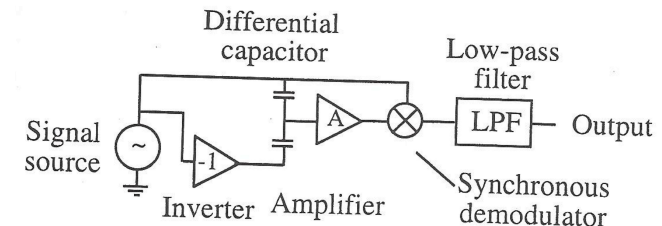


- Ici, V_s est AC, on mesure la position !
- À quoi sert la résistance R_F ?

14

Mesure de la position

- Mesure de capacité « unipolaire » : détection synchrone

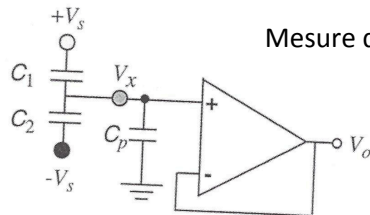


- L'avantage : récupération du signal à basse fréquence, très fiable
- L'inconvénient : nécessite un filtre analogique

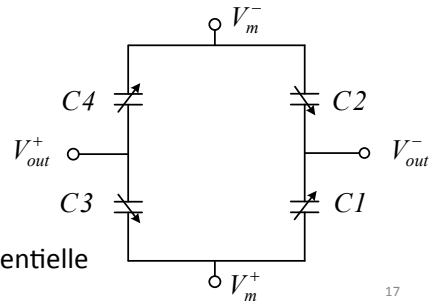
16

Mesure de la position

- Mesure de capacité « différentielle » : principe



Mesure différentielle – sortie unipolaire

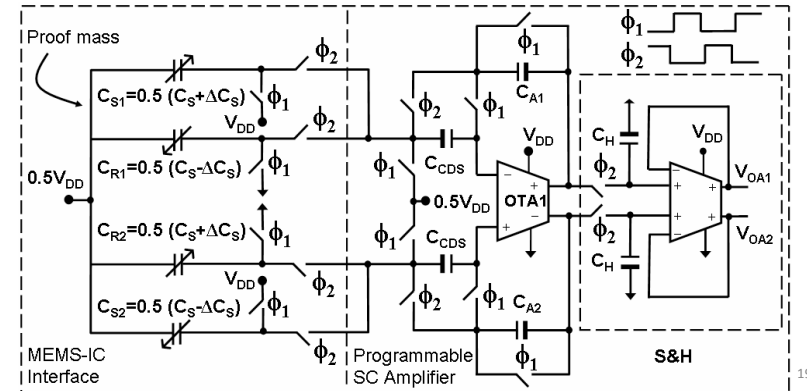


Mesure différentielle – sortie différentielle

17

Mesure de la position

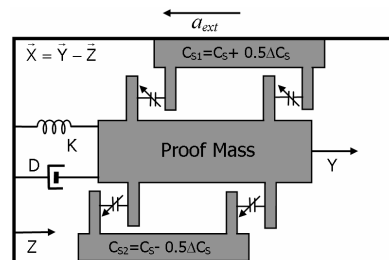
- Exemple d'un circuit complet pour une configuration différentielle (PhD de A. Babak)



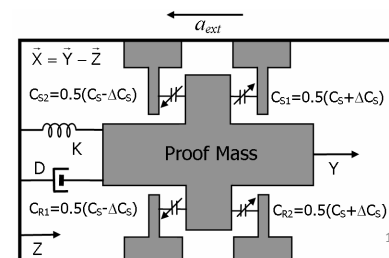
19

Mesure de position

- Mesure différentielle – sortie unipolaire



- Mesure différentielle – sortie différentielle



18

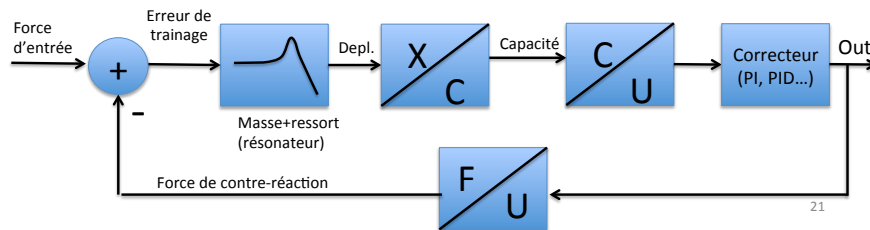
Mesure de la position: conclusion

- Mesure différentielle offre davantage de souplesse pour réaliser les circuits électroniques
- Les capacités commutées ou une détection synchrone sont des techniques utilisées pour mesurer une capacité

20

Fonctionnement en boucle fermée

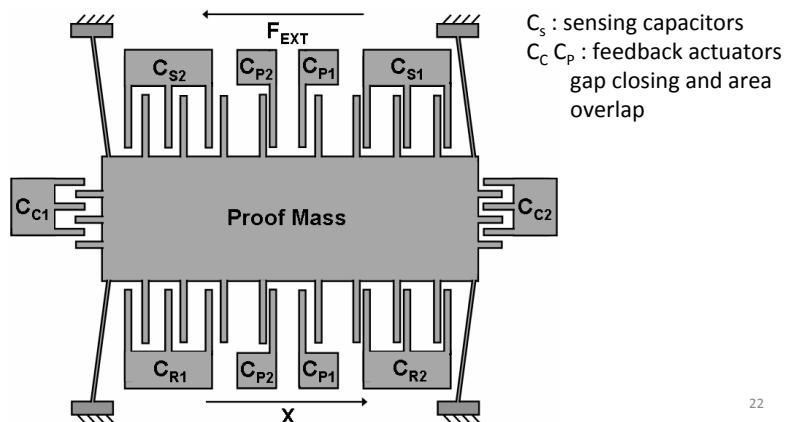
- L'avantage ? Le transducteur reçoit uniquement l'erreur de trainage, 1-2 ordres de grandeur plus faible que la force d'entrée :
 - Non-linéarité !
 - Rapidité (bande passante élargie) !



21

Fonctionnement en boucle fermée

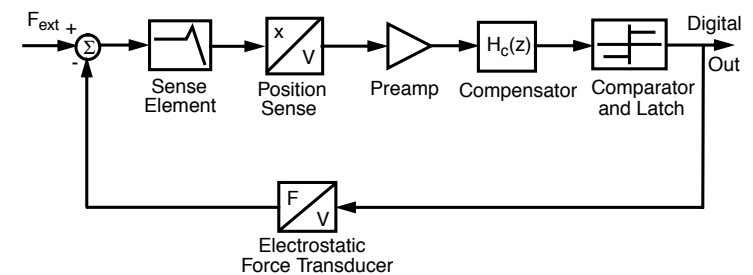
- Contre-réaction un actionnement capacitif !



22

Fonctionnement en boucle fermée

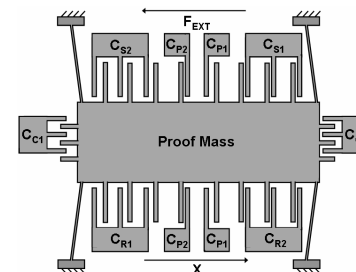
- L'objectif : maintenir le transducteur près de la position d'équilibre
- Architecture Sigma-Delta !



23

Fonctionnement en boucle fermée

- Pourquoi sigma-delta ?
- La force de retour est quadratique en fonc. de U
- Donc, difficile à réaliser quand le système est analogique



Sigma-Delta: le retour est « bang-bang », +1 ou -1
 En plus, une conversion analogique-numérique !

24

Bibliographie

- S. D. Senturia, Microsystem Design, 2001
- Ayman Ismail, **Designing closed-loop MEMS-based capacitive inertial sensors, MEMS technologies**, Electronic Engineering Times Europe March 2013
- Thèse de doctorat de A. Babak, **A Mixed-Signal Low-Noise Sigma-Delta Interface IC for Integrated Sub-Micro-Gravity Capacitive SOI Accelerometers, 2006**
- M. Kraft et al., Closed Loop Micromachined Inertial Sensors with Higher Order SD-Modulators, *2001 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*
- Yin Liang et al., **High resolution interface circuit for closed-loop accelerometer**, Journal of Semiconductors, 2011
- Mark A. Lemkin et al., **A 3-Axis Surface Micromachined $\Sigma\Delta$ Accelerometer**, ISSCC 1997