Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 9

Artikel: Capteurs de force pour robots industriels

Autor: Piller, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904794

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Capteurs de force pour robots industriels

G. Piller

Quelques principes connus sont brièvement rappelés. Les développement actuels de l'Institut de Microtechnique de l'EPFL ont pour objectifs de mettre à disposition de l'industrie un capteur robuste et de coût raisonnable. Deux facteurs y contribuent, d'une part le choix d'une construction modulaire dans laquelle les éléments de mesure sont distincts de la partie mécanique, d'autre part l'usage d'un mode de détection numérique implantable sur un circuit CMOS.

Einige bekannte Prinzipien von Kraft-Moment-Aufnehmern für Industrieroboter werden kurz in Erinnerung gerufen. Die jetzigen Entwicklungsarbeiten des Instituts für Mikrotechnik (EPFL) haben als Ziel, der Industrie einen robusten und preiswerten Sensor zur Verfügung zu stellen. Zwei Faktoren tragen dazu bei, einerseits die Wahl eines modularen Aufbaus, in dem die Messelemente vom mechanischen Teil getrennt sind, anderseits die Anwendung einer digitalen Signalauswertung, die auf einer integrierten Schaltung in CMOS-Technik implantiert werden kann.

Conférence présentée à la Journée d'information ASE «Les capteurs – base de l'automatique de demain», le 8 mars 1983 à l'EPFL, à Ecublens.

Adresse de l'auteur
Gérard Piller, ME – Institut de Microtechnique, EPFL, 1015 Lausanne.

1. Introduction

Certaines tâches telles que des assemblages délicats, le polissage, l'ébavurage, le soudage par points, requièrent d'un robot qu'il soit muni d'un capteur d'efforts qui, selon les cas, permette la mesure simultanée de une à six composantes (fig. 1). De nombreuses publications [1...5], présentent des capteurs de force à six composantes composés d'une structure élastique munie d'un nombre adéquat de jauges de contraintes. Grâce à ce type de capteur, différents laboratoires, dont l'Institut de Microtechnique – EPFL (IMT-EPFL), réalisent quelques opérations didactiques très utiles pour le développement de l'intelligence artificielle, mais leur coût élevé de fabrication et d'exploitation – manque de stabilité, fragilité – leur interdisent jusqu'à présent l'accès à des ateliers de production.

Fondé sur sa propre expérience de ce type de capteur, l'Institut de Microtechnique – EPFL (IMT-EPFL) s'est orienté vers un concept différent avec, pour objectif, la mise à disposition à court terme d'un capteur acceptable dans un environnement industriel.

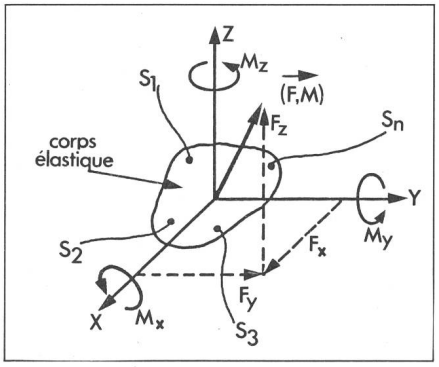

Fig. 1 Décomposition d'une force généralisée dans un repère cartésien

$\vec{F}, \vec{M}$ Force généralisée
$S_1 ... S_n$ Signaux électriques fournis par les capteurs de déformation

2. Quelques capteurs connus

Le principe le plus répandu et sur la base duquel plusieurs versions sont actuellement commercialisées est celui de *V. Scheinman*, développé pour le laboratoire d'intelligence artificielle de Stanford (fig. 2). Il est basé sur une structure élastique à six degrés de liberté, en forme d'étoile à quatre branches. Les déformations de cette structure sont mesurées par une série de jauges de contrainte à semi-conducteur montées sur les branches de la croix. Il y a une jauge sur chaque face de chacune des quatre branches, soit un total de 16 jauges. Les jauges sont câblées par paires. Chaque paire donne un signal qui représente la différence des niveaux de contrainte entre faces opposées d'une même branche. Les problèmes de dérive thermique sont ainsi pratiquement éliminés [4]. La structure est en aluminium et mono-bloc, ce qui évite les problèmes d'hystérèse à la liaison entre les branches et le châssis porteur.

Un second principe a été développé par le Charles Stark Draper Lab. (Cambrigde, Mass.) et reste à l'état expérimental (fig. 3). Comme pour le précédent, on n'a pas recherché une séparation mécanique des réponses aux forces suivant les différents axes.

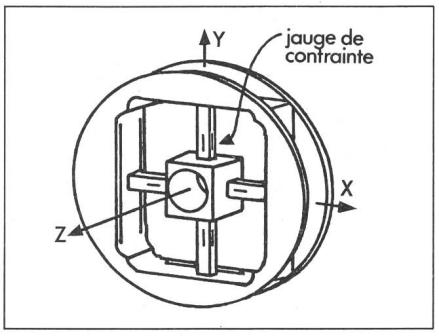

Fig. 2 Capteur de force type Scheinman

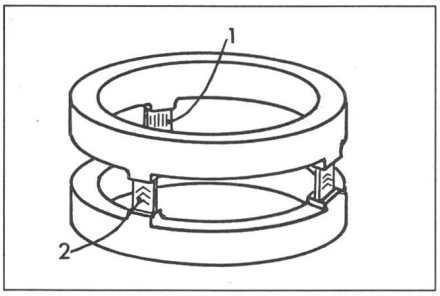

Fig. 3 Capteur de force du Charles Stark Draper Lab.
1 Jauge d'allongement
2 Jauge de cisaillement

La séparation (ou découplage) des forces est réalisée par la multiplication du vecteur formé par les tensions électriques de sortie des ponts de jauges par une matrice de calibrage préalablement déterminée. La structure mécanique peut être soit mono-bloc, soit en plusieurs parties.

Par rapport au principe de *Scheinman,* ce dernier principe présente les avantages de laisser suffisamment de place pour contenir les amplificateurs pour ponts de jauges et de fournir six signaux électriques au lieu de huit, ce qui simplifie la fonction de transfert. Par contre, les raideurs dans les trois axes ne sont pas homogènes, ce qui est une source d'erreurs.

Les composantes de la force sont obtenues par un calcul matriciel qui ralentit son fonctionnement et peut être une source d'erreurs supplémentaires. Par contre, la construction mécanique est très simple.

Nous citerons enfin un capteur développé entre 1975 et 1977 par l'Institut de Microtechnique - EPFL (IMT-EPFL) [1] (fig. 4). Sa structure est formée de deux équerres en profilé d'aluminium reliées par des lames élastiques et des poutres de découplage de telle sorte que la matrice de transfert entre vecteur des tensions électriques et vecteur des forces ait un nombre maximum de coefficients nuls. Le découplage final est alors réalisé par des moyens analogiques.

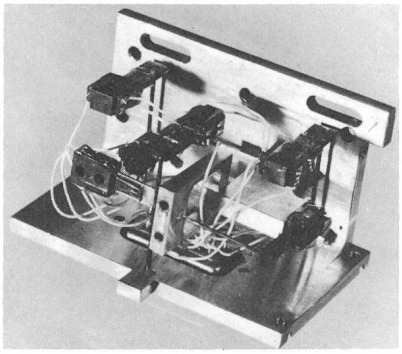

Fig. 4 Capteur développé par l'Institut de Microtechnique EPFL, dérivé d'une balance utilisée en aéronautique

Ce principe, développé avant que l'on connaisse l'usage intensif du microprocesseur, présente l'avantage de la rapidité, mais de nombreux inconvénients parmi lesquels le manque de robustesse et la complexité du montage.

3. Un nouveau concept

3.1 Cahier des charges

Compte tenu de nos propres expériences et de nos contacts avec d'autres laboratoires, nous avons établi le cahier des charges d'un capteur propre à un usage industriel:

a) robustesse vis-à-vis des chocs et des vibrations;
b) modularité, à savoir séparation des moyens de mesure et des parties élastiques, afin de permettre une adaptation simple à différentes gammes de mesure;
c) pas de jauges de contrainte qui posent des problèmes délicats de mise en œuvre et d'exploitation dans un environnement industriel courant;
d) gamme de mesure: ±20 N, ±0,5 Nm, suffisante pour de nombreuses opérations en microtechnique;
e) résolution: 0,1 N; défaut de linéarité ≦3%;
f) raideurs: aussi homogènes que possible et d'amplitudes compatibles à la fois avec les performances du robot et les possibilités des moyens de détection.

3.2 Description

La structure mécanique est composée de deux plateaux rigides en aluminium réunis par trois «jambes» élastiques en acier trempé. On doit assurer un très bon encastrement afin d'éviter les problèmes d'hystérèse (fig. 5). Une étude plus récente a montré qu'il est possible de réaliser une structure mono-bloc s'inscrivant dans un cylindre, ce qui, en gros, diminue l'encombrement (fig. 6).

Pour mesurer les déformations de cette structure suivant six degrés de liberté, on dispose de six capteurs inductifs répartis de telle sorte qu'on ait bien indépendance linéaire entre les relations qui lient les signaux électriques aux composantes de force (fig. 7). Il faut observer que, les bobines d'un capteur d'une part, son noyau d'autre part, étant liés rigidement, respectivement aux deux plateaux rigides, le noyau se déplace à l'intérieur du corps des bobines non pas axialement comme il est d'usage, mais dans une direction quelconque (translations + rotations) (fig. 8). Une telle disposition

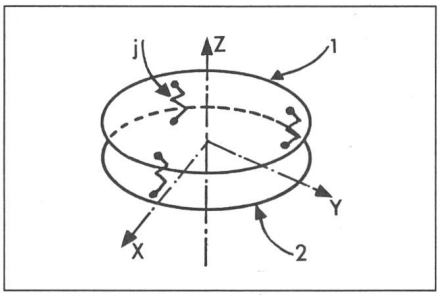

Fig. 5 Schéma d'une structure élastique à six degrés de liberté
1, 2 plateaux rigides
j jambe élastique

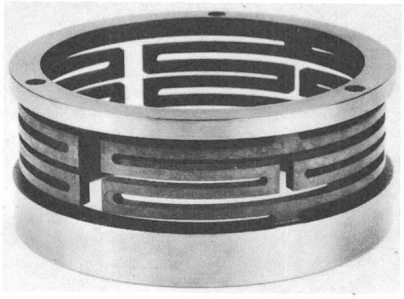

Fig. 6 Structure élastique s'inscrivant dans un cylindre

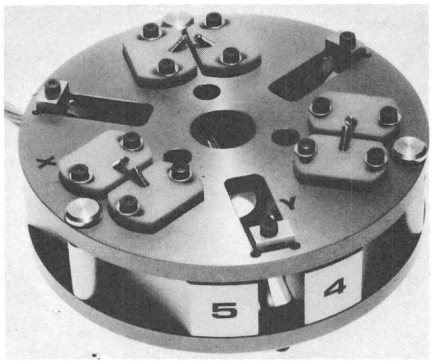

Fig. 7 Capteur de force inductif à six degrés de liberté

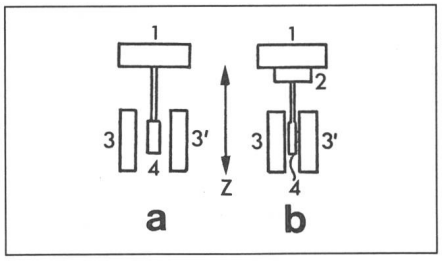

Fig. 8 Montage d'un capteur inductif linéaire
a sans découplage mécanique
b avec découplage mécanique
Z axe du capteur (au sens traditionnel)
1 partie mobile du capteur (porte-noyau)
2 pièce de découplage (ex.: rotule)
3, 3′ bobines
4 noyau

simplifie la mécanique tout en éliminant les problèmes de frottement d'articulations et de guidage, mais introduit une erreur de l'ordre de quelques pour-cents sur les signaux électriques.

L'expression mathématique qui relie les déplacements axiaux des noyaux aux composantes de force est complexe si on doit l'exprimer analytiquement. Dans la réalité, on se contente d'effectuer un calibrage du capteur par une procédure simple et connue. La relation qui lie composantes de force et signaux électriques s'écrit

$$|\vec{\sigma_i}| = |\vec{C_{i1}}, \vec{C_{i2}} \ldots \vec{C_{i6}}| \cdot |\vec{F_i}| \qquad i = 1 \ldots 6 \quad (1)$$

et s'explicite de la façon suivante:

$$\sigma_i = C_{i1} \cdot F_1 + C_{i2} \cdot F_2 + \ldots C_{i6} \cdot F_6 \qquad i = 1 \ldots 6$$

Si l'on applique par exemple une force F_1 alors que les autres composantes de force sont nulles, connaissant les σ_i, il est facile de déterminer les C_{i1}. On détermine ainsi successivement les six colonnes $\vec{C_{i1}}, \vec{C_{i2}} \ldots \vec{C_{i6}}$.

Par la suite, lors de l'exploitation du capteur, on utilisera la relation (2) inverse de la relation (1):

$$|\vec{F_i}| = |C|^{-1} \cdot |\vec{\sigma_i}| \qquad (2)$$

dans laquelle $|C|^{-1} = |\vec{C_{i1}}, \vec{C_{i2}} \ldots, \vec{C_{i6}}|^{-1}$

Dans la suite, on appelle «conditionneur» un circuit comprenant un oscillateur pour alimenter le primaire d'un capteur inductif, un démodulateur synchrone fournissant une tension continue proportionnelle au déplacement du noyau, un amplificateur et un filtre passe-bas. La chaîne de mesure est constituée de conditionneurs, d'un circuit d'acquisition multiplexé et d'un microprocesseur pour le gérer et faire le calcul des composantes de force. La figure 9 représente une chaîne ne comprenant qu'un conditionneur tandis que la figure 10 représente une chaîne comprenant six conditionneurs. La seconde version comporte un plus grand nombre de circuits mais présente l'avantage de pouvoir utiliser une carte A/D standard. Il faut également noter qu'il existe maintenant sur le marché des conditionneurs monolithiques en capsule N pour moins de fr. 30.– à l'unité. Il serait concevable de monter directement sur le capteur le multiplexeur ainsi qu'un conditionneur de façon que ne circulent dans le faisceau de câbles que des signaux analogiques amplifiés ou des signaux TTL. Compte tenu du bruit du conditionneur de l'ordre de 15 mV, de son gain, de la raideur du capteur et de la gamme de mesure, il faut environ 2000, soit 2^{11} points de mesure. On est donc amené à utiliser un convertisseur A/D 12 bits.

Le processeur pourra être un monochip du type 6801 avec cet avantage qu'il possède une instruction de multiplication. Ce circuit possède différents ports dont un port série, ce qui lui permet de communiquer à distance raisonnable avec un ordinateur plus puissant capable de superviser un robot et appelé soit à lire de temps en temps le vecteur force mis à disposition par le processeur décentralisé soit à commander une initialisation (fig. 11).

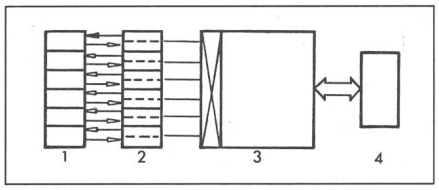

Fig. 10 Chaîne de mesure comprenant six conditionneurs

1 six capteurs inductifs
2 six oscillateurs-démodulateurs synchrones, amplificateurs, filtres passe-bas
3 carte standard d'acquisition multiplexée
4 microprocesseur et annexes

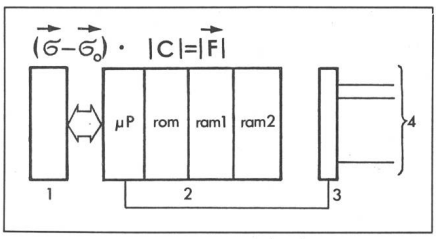

Fig. 11 Détails de la chaîne numérique

1 capteurs, conditionnement, conversion A/D
2 carte microprocesseur comprenant
- en ROM: la matrice de calibrage $|C|$
- en RAM 1: le vecteur force calculé $\vec{F}$, lisible par le superviseur
- en RAM 2: le zéro $\vec{\sigma}_0$ des capteurs; rafraichissement commandé par le superviseur

3 superviseur
4 lignes série de commande des articulations du robot (lisent également les informations de position du robot)

3.3 Caractéristiques du capteur inductif à six composantes

Raideurs (suivant la direction):	0,2 10^6 à 0,7$10^6$ N/m
Résolution (suivant la direction):	0,07 à 0,25 N
Fréquence propre minimum du capteur nu:	> 150 Hz
Ecart de linéarité:	< 1% de l'étendue de mesure
«Diaphonie» (fig. 12):	< 3% de la charge appliquée

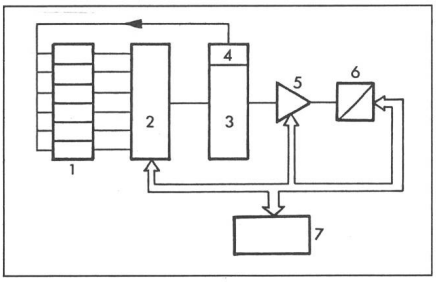

Fig. 9 Chaîne de mesure comprenant un conditionneur

1 six capteurs inductifs
2 multiplexeur
3 démodulateur synchrone, préamplificateur, filtre passe-bas
4 oscillateur
5 amplificateur à gain programmable
6 convertisseur A/D
7 microprocesseur et annexes

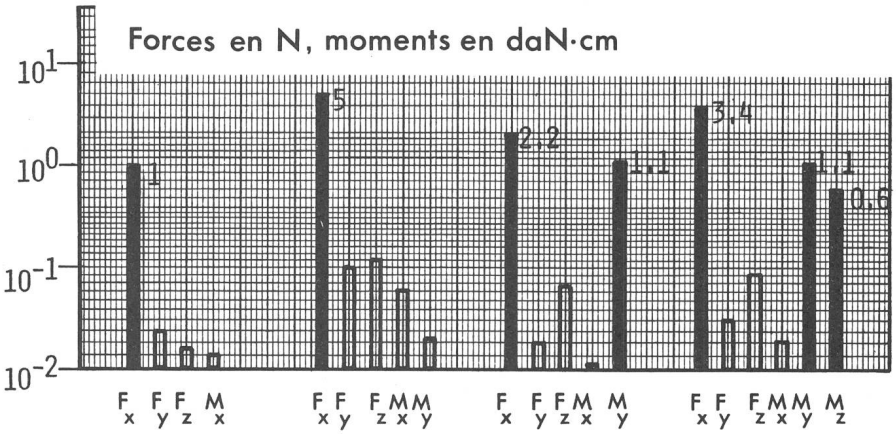

Fig. 12 Erreurs de «diaphonie» dans la mesure d'une force généralisée avec le capteur inductif

En gras: forces appliquées
En clair: erreurs

En guise de conclusion en ce qui concerne ce capteur inductif, on peut remarquer qu'il est nécessairement relativement mou. Par ailleurs, les capteurs inductifs sont tri-dimensionnels et le capteur a une épaisseur non négligeable (35 mm) d'où un porte-à-faux de l'outil ou de la pince. Il faut noter aussi qu'il est nécessaire de prévoir des moyens pour effectuer un réglage initial des noyaux. En contrepartie, ce capteur est léger (340 g), de diamètre faible (90 mm), facile à fixer. Les corps de bobines étant blindés, il est insensible aux champs magnétiques extérieurs. Le capteur inductif est, en soi, insensible à la pollution. Les débattements étant de ±0,25 mm, on peut facilement prévoir des butées de sécurité.

3.4 Version capacitive

Pour éviter les inconvénients mentionnés, nous dirigeons nos recherches vers l'emploi d'un capteur capacitif. La figure 13 montre un exemple de configuration d'électrodes qui, convenablement reliées, permettent de mesurer un déplacement suivant six degrés de liberté. La détection se fait en deux temps. Tout d'abord, les électrodes sont reliées de façon que l'on puisse mesurer la distance entre les deux plaques d'électrodes. Puis on les relie de façon à mesurer les déplacements latéraux. Les calculs doivent de la même façon se faire en deux temps. La mesure des capacités peut par exemple se faire à l'aide de ponts différentiels et de comparateurs à capacités commutées. Etant donné la très grande sensibilité de ce système, on peut utiliser une structure élastique plus rigide et envisager à la fois une meilleure résolution et une gamme de mesure plus étendue.

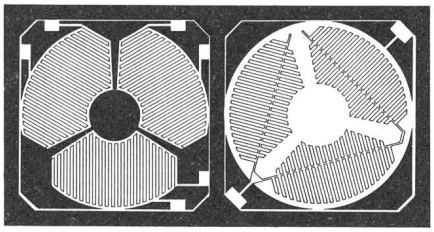

Fig. 13 Electrodes et contre-électrodes destinées à la mesure capacitive d'un déplacement généralisé à six degrés de liberté

4. Conclusion

Plusieurs laboratoires dans le monde ont développé ces dernières années des capteurs de force pour robots utilisables en laboratoire et dont l'efficacité a été démontrée à l'aide de manipulations souvent spectaculaires. Cependant, un grand pas reste à franchir sur le plan de la robustesse et du coût. Nous pensons y avoir contribué par la mise à disposition de l'industrie du capteur inductif que nous avons développé. La mise au point d'une version capacitive où les réglages mécaniques ne sont plus nécessaires, où l'élément de mesure est bon marché et le traitement de signaux purement numérique conduira à une réduction très sensible du coût de fabrication.

Bibliographie

[1] *D. Helms:* Entwicklung eines Sechs-Komponenten-Kraft-Moment-Aufnehmers. Feinwerktechnik und Messtechnik 85(1977)2, p. 75...81.

[2] *P. Watson* and *S. Drake:* Method and apparatus for six degree of freedom force sensing. Cambridge/Massachusetts, The Charles Stark Draper Laboratory Inc. US Patent 4 094 192, June 13, 1978.

[3] *M. Kasai* a. o.: Trainable assembly system with an active sensory table possessing 6 axes. Proceedings of the 11th International Symposium in Industrial Robots, Tokyo/Japan, October 1981; p. 393...404.

[4] *B. E. Shimano:* The kinematic design and force control of computer-controlled manipulators. Thesis of the University of Standford/California 1978.

[5] *G. Hirzinger:* Force feedback problems in robotics. Second Symposium of the International Association of Science and Technology for Development (IASTED), Davos/Switzerland, March 2...5, 1982.