

Erreurs des capteurs de force et de déplacement à poutre dues aux forces de frottement

Estimation des sources d'erreur dues aux frottements sur les capteurs de force et de déplacement à poutre en flexion (cantilever).

Einschätzung der durch Reibung verursachten Fehler auf Biegebalken Kraft- und Wegsensoren.

Thomas Maeder, 3.4.2001

Projets: ajustement capteurs, MilliNewton, SenCycle.

Mots-Clefs: capteurs de force, poutre, cantilever, frottement.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Effet du frottement contre une surface plane	3
3. Effet du frottement dans un cône	6

Résumé

Les forces de frottement sur la bille de capteurs de force et de déplacement génèrent des moments parasites sur la poutre et entraînent donc des erreurs de mesure. L'erreur relative est potentiellement d'autant plus grande que les coefficients de frottement sont grands, la bille est grande et la poutre est courte. Pour éviter ces erreurs, il faut découpler latéralement le support du capteur et la pièce appliquant la force, en diminuant par exemple la rigidité latérale.

Kurzfassung

Die Reibungskräfte auf der Kugel von Kraft- und Wegsensoren verursachen parasitäre Biegemomente auf den Biegebalken und dadurch Messfehler. Potenzielle Fehler steigen mit grossen Reibungskoeffizienten, mit grossen Kugel und kurzen Biegebalken. Sie können aber vermieden werden, indem man lateral die Unterlage des Sensors mit dem die Kraft ausübenden Teil entkoppelt, z.B. durch Herabsetzung der lateralen Steifigkeit.

1. Introduction

Les forces de frottement sur la bille et les moments parasites qu'elles génèrent peuvent générer des erreurs importantes sur les capteurs de force ou de déplacement à poutre de type MilliNewton et SenCycle. Dans cette étude, on se propose de les caractériser, par calcul et mesure.

- Lors de l'ajustement des capteurs MilliNewton (fig. 1-1), la contribution au signal des efforts horizontaux sur la bille (F_x) est apparue comme une source majeure d'erreur. Cette force est souvent due au frottement entre la pièce appliquant la force sur le capteur et la bille. Son importance croît fortement pour les poutres courtes ayant des grandes billes. Ce phénomène peut aussi générer une hystérèse dans l'application SenCycle.
- Un autre cas de figure se présente si on applique la force en suspendant un poids. Dans ce cas, la charge est usuellement centrée sur la bille par un cône (fig. 1-2). Le frottement dans ce cône peut aussi générer un signal parasite.

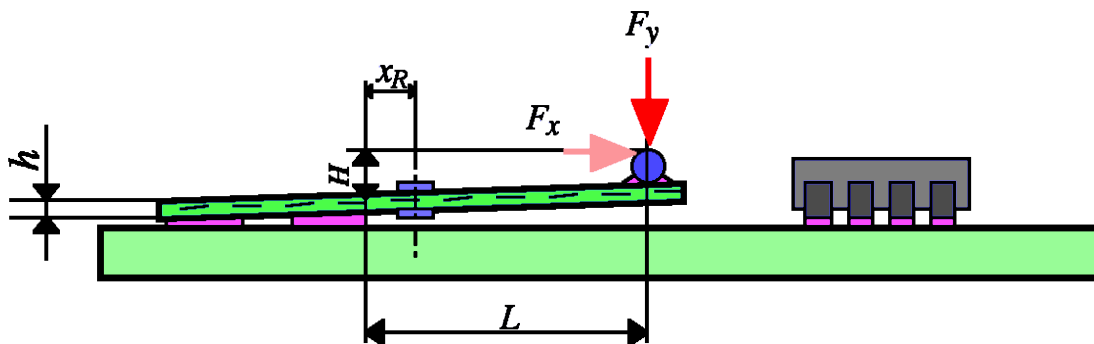


Fig. 1-1. Schéma d'un capteur de force à poutre en flexion. Pour MilliNewton, $L = 8$ mm.

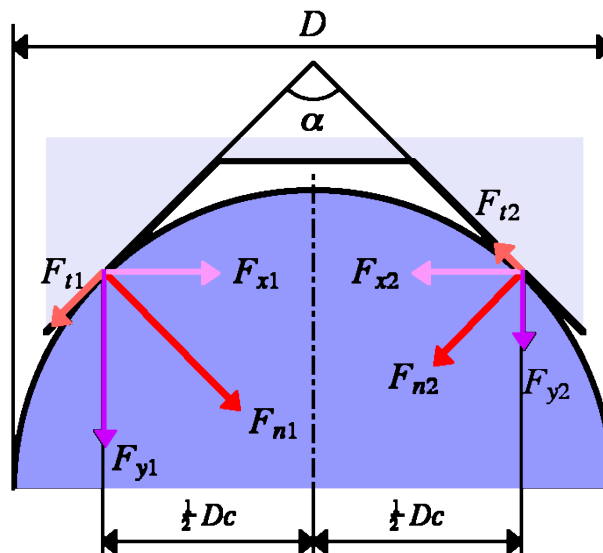


Figure 1-2. Frottement de la bille dans un cône, montrant les forces normales F_n , les forces de frottement F_t et les résultantes horizontales F_x et verticales F_y .

2. Effet du frottement contre une surface plane

2.1. Accouplement rigide dans le sens latéral

A partir de la fig. 1–1, on peut écrire le moment de flexion dû à la force appliquée F_y et celui dû à la force parasite longitudinale F_x .

Dans le pire des cas (par exemple, l'application SenCycle), l'accouplement entre le capteur et la surface appliquant la force est rigide dans le sens latéral (x). La force parasite F_x est alors due au frottement de la bille contre la surface, ce qui permet d'écrire l'erreur relative M_x / M_y en fonction du coefficient de frottement μ .

On a estimé cette erreur pour 2 cas particuliers : les anciennes versions de MilliNewton et SenCycle, pour un coefficient de frottement raisonnable $\mu = 0.2$. Selon la table 2–I, on obtient 7.3% pour MilliNewton et 2.5% pour SenCycle. Dans cette dernière application, on a en réalité une erreur plus grande, en raison de la précontrainte. L'erreur croît considérablement pour les poutres courtes munies d'une grande bille. Le passage à des billes de 1 mm réduirait l'erreur environ de moitié, et doit donc être envisagé.

$$M_y = F_y \cdot (L - x_R)$$

$$M_x = F_x \cdot H$$

$$\frac{M_x}{M_y} \cong \mu \cdot \frac{H}{(L - x_R)}$$

M_y	moment dû à la force verticale appliquée
M_x	moment dû à la force horizontale parasite
μ	coefficient de frottement (typ. 0.05 à 0.3)
H	différence de hauteur entre axe neutre au point de flexion et sommet de la bille
L	longueur effective de la poutre
x_R	position des résistances

Produit	MilliNewton (ancienne version)	SenCycle (ancienne version, longueur moyenne)
L	8.0 mm	21.5 mm
x_R	2.0 mm	4.0 mm
H	2.2 mm	2.2 mm
μ	0.2	0.2
Erreur M_x / M_y	7.3%	2.5%

Tableau 2–I. Erreurs dues au frottement de la bille contre une surface plane, pour les anciennes versions de MilliNewton et SenCycle.

2.1. Accouplement de rigidité limitée dans le sens latéral

Dans ce cas, on considère que la force parasite F_x n'est plus limitée par le coefficient de frottement μ , mais par le produit de la rigidité latérale k de l'accouplement capteur - surface et d'un déplacement horizontal parasite Δx . A titre d'exemple, on traite ici aussi les deux cas MilliNewton et SenCycle (anciennes versions), mais dans un contexte particulier.

- **MilliNewton**. On traite le cas de la carte servant à ajuster le capteur, où le problème des moments parasites dus aux forces latérales a dû être résolu (fig. 2-1).
- **SenCycle**. On explore la possibilité de remplacer la bille par une tôle mince (fig. 2-2).

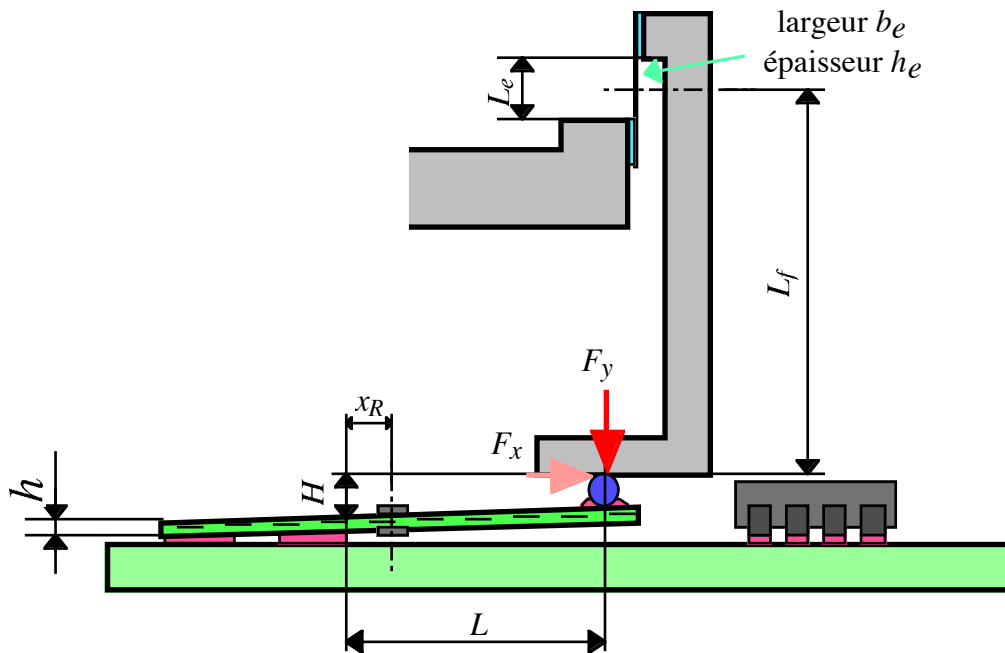


Figure 2-1. Principe de découplage latéral de la carte d'ajustement de MilliNewton.

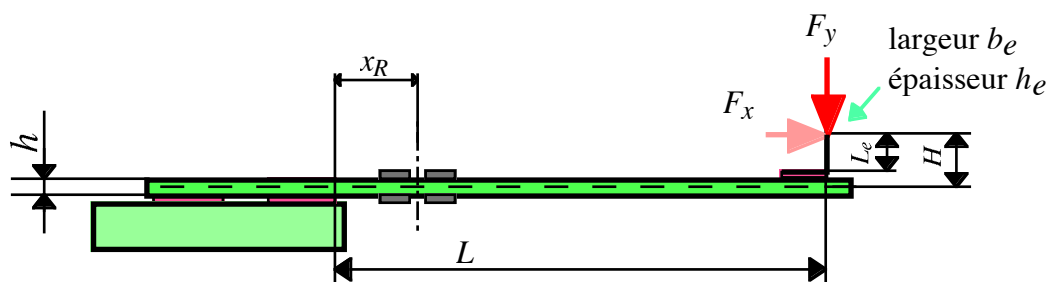


Figure 2-2. Variante de la poutre SenCycle où la bille est remplacée par une tôle flexible.

$$k \cong \frac{E_e^* \cdot b_e \cdot h_e^3}{12 \cdot L_e \cdot L_f^2} \text{ (carte aj. MilliNewton)}$$

$$k \cong \frac{E_e^* \cdot b_e \cdot h_e^3}{4 \cdot L_e^3} \text{ (SenCycle + tôle)}$$

$$E_e^* \cong \frac{E_e}{1 - \nu_e^2}$$

$$\frac{\Delta M_x}{\Delta M_y} = \frac{k \cdot \Delta x \cdot H}{(L - x_R) \cdot \Delta F_y}$$

k	rigidité latérale
E_e^*	module élastique effectif de la tôle flexible
E_e	module élastique de Young de la tôle flexible
ν_e	coefficient de Poisson de la tôle flexible
b_e	largeur de la tôle flexible
h_e	épaisseur de la tôle flexible
L_e	longueur de la tôle flexible
L_f	longueur du "doigt" (aj. MilliNewton)
H	différence de hauteur entre axe neutre au point de flexion et point d'application de la force
Δx	course horizontale maximale
ΔF_y	variation (étendue) des forces verticales appliquées
ΔF_x	variation (étendue) des forces horizontales parasites
$\Delta M_x / \Delta M_y$	erreur relative maximale

Pour des paramètres estimés raisonnables, on obtient, selon le tableau 2–II, des erreurs très faibles, à savoir env. 0.02% pour la carte d'ajustement de MilliNewton et env. 0.2% pour SenCycle avec lame élastique.

Produit	MilliNewton (carte d'ajustement, valeurs estimées)	SenCycle (avec tôle élastique au lieu de la bille, valeurs estimées)
ΔF_y	400 mN	70 mN
Δx	0.2 mm	0.01 mm
L	8.0 mm	21.5 mm
x_R	2.0 mm	4.0 mm
H	2.2 mm	2.2 mm
L_e	2.0 mm	2.0 mm
b_e	0.6 mm	1.0 mm
h_e	0.05 mm	0.03 mm
L_f	25 mm	-
E_e^*	210 GPa (acier)	140 GPa (laiton)
k	1.1 N/m	118 N/m
Erreur $\Delta M_x / \Delta M_y$	0.02%	0.21%

Tableau 2–II. Erreurs dues au frottement de la bille contre une surface plane, pour les anciennes versions de MilliNewton et SenCycle.

3. Effet du frottement dans un cône

Dans certains cas, on mesure la force en suspendant un poids à la poutre, dont le positionnement est assuré sur la bille par un logement conique (fig. 1–2). L'erreur obéit alors à une dépendance assez similaire au cas du frottement contre une surface plane. On prend le pire des cas, c'est-à-dire quand la bille est soutenue par deux points définissant une droite parallèle à l'axe de la poutre.

Comme dans la partie précédente, l'erreur est estimée pour les anciennes versions de MilliNewton et SenCycle, pour un coefficient de frottement $\mu = 0.2$. Selon la table 3–I, on obtient une erreur maximale de 3.7% pour MilliNewton et 1.3% pour SenCycle.

Cependant, en pratique, on mesure des erreurs nettement plus faibles ; on peut s'arranger pour que les oscillations résiduelles du poids soient dans le sens de la largeur, et les oscillations, vibrations, etc. font que le couple résiduel exercé par le cône sur la bille est beaucoup plus faible que la limite donnée par les frottements statiques. Pour MilliNewton, par exemple, la reproductibilité d'une telle mesure est de l'ordre de 0.1%.

$$F_{t1} = \mu \cdot F_{n1} \text{ et } F_{t2} = \mu \cdot F_{n2}$$

$$c = \cos(\alpha/2) \text{ et } s = \sin(\alpha/2)$$

$$F_y = (F_{n1} + F_{n2}) \cdot s + (F_{t1} - F_{t2}) \cdot c$$

$$0 = (F_{n1} - F_{n2}) \cdot c - (F_{t1} + F_{t2}) \cdot s$$

$$F_{n1} = F_y \cdot \frac{c + \mu s}{2cs \cdot (1 + \mu^2)} \text{ et } F_{n2} = F_y \cdot \frac{c - \mu s}{2cs \cdot (1 + \mu^2)}$$

$$M_y = F_y \cdot (L - x_R)$$

$$M = F_y \cdot \left[L - x_R - \frac{1}{2} D \cdot \frac{\mu}{s \cdot (1 + \mu^2)} \right]$$

$$\frac{M_y - M}{M_y} = \frac{\mu \cdot D}{2 \cdot s \cdot (1 + \mu^2) \cdot (L - x_R)}$$

F_y	force verticale appliquée
F_{n1}, F_{n2}	forces normales
F_{t1}, F_{t2}	forces de frottement
F_{x1}, F_{x2}	composantes horizontales
F_{y1}, F_{y2}	composantes verticales
μ	coefficient de frottement (typ. 0.05 à 0.3)
L	longueur effective de la poutre
x_R	position des résistances
D	diamètre de la bille
M_y	moment nominal, dû à la force verticale appliquée
M	moment effectivement appliqué

Produit	MilliNewton (ancienne version)	SenCycle (ancienne version, longueur moyenne)
L	8.0 mm	21.5 mm
x_R	2.0 mm	4.0 mm
D	2.0 mm	2.0 mm
μ	0.2	0.2
α	120°	120°
Erreur $(M_y - M) / M_y$	3.7%	1.3%

Tableau 3–I. Erreurs maximales estimées dues au frottement de la bille dans un cône, pour les anciennes versions de MilliNewton et SenCycle.