

– DYNABAL : BALANCED-DYNAMOMETER –
CAPTEUR DE FORCE À RIGIDITÉ RÉGLABLE

INSENSIBLE AUX ACCÉLÉRATIONS EN TRANSLATION ET ROTATION

Enoncé du projet effectué en groupes de cinq étudiant·e·s durant le semestre de printemps 2023

OBJET DU PROJET

Une approche classique pour la conception de capteurs de force est d'utiliser un **corps d'épreuve** déformable élastiquement qui convertit la force à mesurer en un déplacement (transducteur *force* → *déplacement*). Le déplacement est ensuite mesuré par un capteur de position qui joue le rôle de transducteur *déplacement* → *signal électrique*. Lorsque la caractéristique force-déformation du corps d'épreuve est linéaire, la *sensibilité* du capteur de force est inversement proportionnelles à sa rigidité. Ainsi, pour améliorer la *résolution* de mesure de force, il est nécessaire de réduire la rigidité autant que possible. En outre, pour les mesures des faibles forces, il est nécessaire de s'affranchir de toutes les forces autres que la force de contact à mesurer : il s'agit en particulier du poids propre des parties mobiles du capteur (effet du champ de gravité), ainsi que des forces d'inerties résultant des mouvements éventuels du capteur durant les mesures. Le but de ce projet est de concevoir un capteur dont le corps d'épreuve est un mécanisme à guidages flexible à rigidité réglable qui permet de s'approcher autant que possible de la rigidité nulle et dont les pièces mobiles sont équilibrées dynamiquement, donc insensibles aux forces de gravité et d'inertie. Ce capteur est dédié à des mesures de force de très haute résolution effectuées à cadence élevée par des micromanipulateurs robotisés.

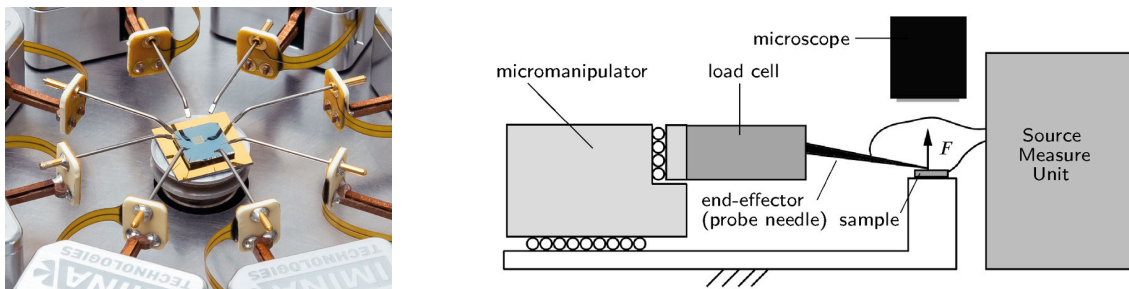


Fig. 1 : Ensemble de 8 manipulateurs dédiés à des mesures de résistivité électrique sur un circuit intégré et schéma d'une station de mesure (*load cell* est le capteur de force). [Source : Imina Technologies SA]

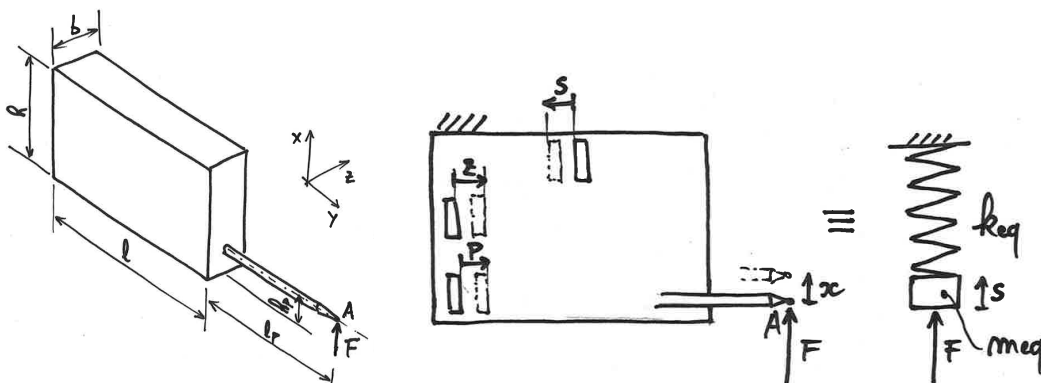


Fig. 2 : Schéma du capteur de force et du dynamomètre équivalent. Une force F appliquée à l'extrémité de la sonde déplace le point A d'une distance x ce qui induit un déplacement proportionnel s de la cible du capteur de position. La rigidité équivalente k_{eq} dépend du réglage de la précharge p . La fréquence propre du corps d'épreuve est $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}}$. La force correspondant à la position $x = 0$ est ajustée au moyen du réglage du zéro (z).

DEFINITIONS

- F [N] : Force agissant sur le capteur au point A, parallèlement à l'axe X : $0 \leq F \leq F_{\max}$;
- x [m] : Déplacement du point A induit par F : $0 \leq x \leq x_{\max}$;
- s [m] : Déplacement de la cible du capteur de position : $0 \leq s \leq s_{\max}$;
- i : Rapport de transmission $i = x/s$ (Remarque : on fait l'hypothèse que i est constant) ;
- z [m] : Déplacement du mécanisme de correction du zéro : $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$;
- p [m] : Déplacement du mécanisme de précharge (compensation de rigidité) : $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$;
- M_p, M_z [Nm] : Couples moteurs requis pour actionner les vis de réglage de rigidité resp. de zéro ;
- q_p, q_z [m] : pas de la vis de réglage de précharge resp. de réglage de zéro ;
- d_p, d_z [m] : diamètre de la vis de réglage de précharge resp. de réglage de zéro ;
- $R_{\alpha p}, R_{\alpha z}$ [rad] : Résolution angulaire de rotation de la vis de précharge resp. de zéro ;
- R_p, R_z [m] : Résolution du réglage de la précharge de compensation de rigidité resp. de zéro ;
- R_s [m] : Résolution du capteur de position ;
- D_s : Gamme dynamique du capteur de position : $D_s = s_{\max}/R_s$;
- m_{eq} [m] : Masse équivalente des parties mobiles du corps d'épreuve.
- f_0 [Hz] : Fréquence propre du corps d'épreuve.

Pour un réglage de précharge p donné nous avons :

- $E(x)$ [J] : Energie potentielle élastique totale du corps d'épreuve en fonction du déplacement x .
Il s'agit de la somme des énergies potentielles élastiques de toutes les articulations flexibles :
 $E(x) = E_1(x) + E_2(x) + \dots + E_n(x)$.
- $F(x)$ [N] : Caractéristique force-déformation non-linéaire du corps d'épreuve : $F(x) = dE(x)/dx$.
- $F_{poly3}(x)$ [N] : Caractéristique force-déformation approximée par un polynôme de degrés trois :
 $F(x) \cong F_{poly3}(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$;
- μ_r : Non-linéarité relative : $\mu_r = a_3/a_1$;
- k [N/m] : Rigidité à l'entrée du capteur de force : $k = a_1 \cong F/x$;
- $F_{lin}(x)$ [N] : Caractéristique force-déformation linéarisée : $F(x) \cong F_{lin}(x) = k \cdot x$.
- $s(x)$ [m] : Déplacement de la cible du capteur de position induit par le déplacement x .
- k_{eq} [N/m] : Rigidité équivalente du corps d'épreuve : $k_{eq} \cong F/s = k \cdot x/s = k \cdot i$. Remarque : une fois k_{eq} connue, la force appliquée est déterminée via la relation $F \cong k_{eq} \cdot s$.
- S [m/N] : Sensibilité du capteur de force : $S = 1/k_{eq}$.
- R_F [N] : Résolution du capteur de force : $R_F = k_{eq} \cdot R_s = k_1 \cdot i \cdot R_s$.
- F_{\max} [N] : Etendue de la plage de mesure du capteur de force : $0 \leq F \leq F_{\max}$
avec $F_{\max} \cong k_{eq} \cdot s_{\max}$.
- D_F : Gamme dynamique du capteur de force : $D_F = F_{\max}/R_F$.

Avec les valeurs extrêmes du réglage de précharge p_{\min} et p_{\max} nous définissons respectivement :

- $k_{eq, \max}$ et $k_{eq, \min}$: bornes de la plage de réglage de rigidité ;
- f_{\min} et f_{\max} : fréquences propres du corps d'épreuve ;
- $F_{\max}(k_{eq, \max})$: plus grande force que peut mesurer le capteur avec son réglage le plus rigide ;
- $R_F(k_{eq, \min})$: résolution du capteur de force avec son réglage le moins rigide ;
- D_{Fv} : gamme dynamique *virtuelle* du capteur de force : $D_{Fv} = F_{\max}(k_{eq, \max})/R_F(k_{eq, \min})$.

CAHIER DES CHARGES

Il s'agit de critères idéaux que votre mécanisme ne pourra peut-être pas tous remplir. Les points de non-conformité seront à discuter et justifier dans le rapport. Remarque : Les critères entre parenthèses (...) sont indicatifs, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas nécessairement être pris en compte dans les calculs de dimensionnement, en raison du temps limité pour ce projet.

A. Composants imposés :

1. Capteur de position capacitif *Micro-Epsilon CSH05FL* avec une résolution $R_d = 10$ nm et plage de mesure $x_{max} = 0,5$ mm. (Fiche technique en annexe) ;
2. Sonde de mesure à monter sur le bloc mobile du corps d'épreuve selon Fig. 6 ;
3. Actionneurs pour le réglage de la rigidité et le réglage du zéro : deux moteurs Maxon EC-max 16 Ø16 mm, brushless, 5 W avec réducteur planétaire GP 16 A Ø16mm, 29:1 et codeur optique MR, Type ML à 512 traits par tour. (Fiches techniques en annexe : Fig. 4, 5 et 3) ;
4. Ensembles vis-écrou pour la conversion des mouvement des moteurs en mouvements de translation : filets métriques à pas fin, dont les diamètres et les pas sont à déterminer ;
5. Roulements pour le guidage des vis à choisir dans le catalogue SKF mis à disposition ;
6. Accouplements entre moteurs et vis à trouver dans le commerce ;
7. Aucun autre composant commercial n'est autorisé ;

B. Encombrement :

8. Le capteur de force doit idéalement s'inscrire à l'intérieur d'un parallélépipède (Fig. 2) avec $l = 150$ mm, $h = 100$ mm et $b = 50$ mm. Des excroissances sont autorisées pour autant que le volume total reste inférieur à $l \times h \times b$.
9. Orientation de la sonde (Fig. 2) : l'axe de la sonde en position nominale ($x = 0$) est parallèle à l'axe Y . Les forces à mesurer sont parallèles à l'axe X et ne s'appliquent que dans un seul sens ($F \geq 0$).
10. Dégagement de la sonde (Fig. 2) : $l_p = 28$ mm et $h_p \leq 10$ mm

C. Equilibrage (à considérer uniquement dans la position nominale : $x = 0$ et $F = 0$) :

11. Capteur insensible à l'orientation de la gravité ;
12. Capteur insensible aux accélérations en translation dans toutes les directions ;
13. Capteur insensible aux accélérations en rotation dans toutes les directions ;
14. (Equilibrage inertiel : insensibilité du capteur aux vitesses angulaires de son référentiel) ;

D. Performance :

15. Plage de mesure : $F_{max} \geq 50$ mN ;
16. Résolution de mesure : $R_F \leq 500$ nN. Il s'agit du principal critère d'optimisation du capteur qui consiste à minimiser la valeur $R_F(k_{eq,min})$.
17. Correction du zéro : le système de réglage doit permettre de corriger des forces parasites selon l'axe X dans l'intervalle suivant : -1 mN $\leq F_{parasite} \leq 1$ mN ;
18. Corps d'épreuve réalisé dans des matériaux électriquement conducteurs pour permettre des mesures électriques ;
19. Corps d'épreuve réalisé dans des matériaux amagnétiques pour éviter les forces parasites ;
20. (Le système doit supporter des forces parasites dans toutes les directions autres que X allant jusqu'à ± 2 N sans dommage irréversibles) ;
21. (Nombre de cycles indicatif : 1000 cycles par jour, durant 10 ans) ;
22. (Prix de fabrication indicatif inférieure à 8000.- CHF pour petites séries $\simeq 100$ par année) ;
23. (Température de fonctionnement : $T_{fonc} = 20 \pm 30^\circ\text{C}$) ;

DIMENSIONNEMENT

1. Réglage de la rigidité : déterminer q_p , d_p , $R_{\alpha p}$, R_p ;
2. Réglage du zéro : q_z , d_z , $R_{\alpha z}$, R_z et la résolution en force au point A : R_{Fz} [N] ;
3. Calculer les débattements de toutes les articulations flexibles en fonction de x , p et z ;
4. Vérifier que pour toutes les articulation flexibles les contraintes maximales ne dépassent pas les contraintes admissibles sur toute la plage de fonctionnement ;
5. Calculer les couples moteur M_p et M_z maximaux requis pour couvrir toutes les plages de réglage ;
6. Calculer $E(x) = E_1(x) + E_2(x) + \dots + E_n(x)$ et tracer un graphique montrant chaque terme ainsi que la somme $E(x)$ en fonction de x pour les réglages extrêmes p_{\min} et p_{\max} ; .
7. Calculer numériquement la dérivée $F(x) = dE(x)/dx$ pour p_{\min} et p_{\max} ;
8. Déterminer numériquement les coefficients k_1 et k_3 des polynômes approximant $F(x)$ pour p_{\min} et p_{\max} ;
9. Déterminer la plage de réglage de rigidité de votre mécanisme $k_{eq,\min} \leq k_{eq} \leq k_{eq,\max}$ correspondant aux réglages p_{\max} , respectivement p_{\min} (note : vérifier bien que $k_{eq,\min} > 0$) ;
10. Calculer la non-linéarité relative μ_r pour p_{\min} et p_{\max} ;
11. Tracer sur un même graphique les fonctions $F(x)$, $F_{poly3}(x)$ et $F_{lin}(x)$ afin de visualiser la non-linéarité pour p_{\min} et p_{\max} ;
12. Calculer la masse équivalente du corps d'épreuve m_{eq} ;
13. Calculer les fréquences propres f_{\min} et f_{\max} du corps d'épreuve ;
14. Calculer la résolution de mesure R_F de votre capteur pour p_{\min} et p_{\max} ;
15. Calculer la plus grande force que peut mesurer votre capteur F_{\max} pour p_{\min} et p_{\max} ;
16. Calculer la gamme dynamique virtuelle de votre capteur $\boxed{D_{Fv}}$;

TABLE DES MATIERES DU RAPPORT

1. Introduction

2. Principe de fonctionnement

2.1. Explication du principe de fonctionnement

2.1.1 Architecture générale du capteur

2.1.2 Principe de compensation de rigidité

2.1.3 Principe de l'équilibrage (analyse qualitative uniquement, sans calculs)

2.1.4 Principe de réglage du zéro

2.1.5 Principe du système vis-écrou (anti-rotation, rattapage des jeux, guidage vis, accouplement)

2.2. Schéma cinématique du corps d'épreuve représenté avec des articulations idéales

2.3. Calcul de la mobilité du corps d'épreuve (Grübler) et discussion des hyperstatismes

2.4. Implémentation de la cinématique du corps d'épreuve en guidages flexibles

2.5. Discussion qualitative de la linéarité du rapport de transmission ($i \approx \text{constante}$).

2.6. Mise en évidence des concepts originaux et explications spécifiques à la solution retenue

3. Dimensionnement du mécanisme :

Suivre point par point la section DIMENSIONNEMENT ci-dessus.

4. Discussion :

4.1. Expliquer la séquence de réglage retenue pour obtenir la meilleure gamme dynamique (rigidité, zéro, fréquence, calibration avec capteur ou tare externes etc.).

4.1. Lister les non-conformités avec le cahier des charges et discuter leur impact.

4.2. Discuter les effets des tolérances de fabrication (typiquement $\pm 3 \mu\text{m}$ pour l'usinage par électroérosion à fil) sur la performance du capteur

5. Construction

5.1. Argumenter les choix faits pour la construction

5.2. Argumenter les choix des matériaux

6. Conclusion

7. Annexes

7.1. Dessin de construction de l'ensemble du capteur de force

7.2. Dessin de détail de la vis

CONCEPTION PRELIMINAIRE

Planches Chaque groupe élabore un catalogue de 4 solutions bien distinctes. Chaque solution est présentée sur une feuille A3 (recto) séparée en deux parties : une partie A qui décrit l'architecture cinématique représentée avec des guidages idéaux en montrant le principe de fonctionnement de la solution, ainsi que les sources d'inspiration qui y ont mené ; une partie B qui montre une vue d'artiste de la solution avec son implémentation avec guidages flexibles. Tous les dessins sont effectués à main levée et en couleur. La 5^e planche met en exergue la solution retenue en explicitant les raisons du choix.

Vidéos Les 5 étudiant·e·s se répartissent les 5 planches, et chacun·e réalise une vidéo de 3 minutes (plan séquence, sans montage) présentant oralement la planche.

CONCEPTION DETAILLEE

Dessin d'ensemble du capteur de force Réaliser un dessin assisté par ordinateur du capteur de force. Le dessin d'ensemble comporte les cotes fonctionnelles, les cotes d'encombrement, les ajustements, le cartouche complet avec la liste de toutes les pièces et leurs matériaux indiqués selon ISO. Faire toutes les coupes et vues nécessaires à la compréhension et au contrôle du fonctionnement du mécanisme. L'échelle des dessins (normalisée) sera choisie pour rendre leur lecture aisée ; les ajustements et tolérances, en particulier ceux concernant le montage des roulements, seront explicités. Exemple : $\varnothing 4 \text{ H7 } ^{+0.012}_0 \text{ g6 } ^{-0.004}_{-0.012}$. Pour des raisons pratiques et de coût, on se limitera autant que possible aux formats A4 à A2.

Dessin de détail de la vis Réaliser un plan de détail de la vis prêt pour l'envoi à l'atelier. (Les dessins de détail des autres pièces du mécanisme ne sont pas requis).

Rapport Un rapport de 15 à 25 pages basé sur la table de matière ci-dessus. Le rapport présente la conception détaillée du mécanisme avec des explications claires et concises de son fonctionnement, en faisant appel au maximum aux schémas. Donner les indications et explications nécessaires au suivi et à la compréhension de la démarche (hypothèses, simplifications choisies, dimensions considérées, valeurs utilisées pour le calcul, sources, etc.). Lister, justifier et discuter l'impact des éventuelles non-conformités avec le cahier des charges.

LIVRABLES

Jeudi 6 avril 2023 à 19h00, rendu conception préliminaire :

Chaque étudiant·e uploade sa **planche** sur MOODLE et uploade une seconde fois sa **planche** sur GOOGLEDRIVE cette fois accompagnée de la **vidéo de 3 minutes**.

Vendredi 19 mai 2023 à 19h00, rendu conception détaillée :

Une personne du groupe uploade le **rapport**, y compris le **plan d'ensemble**, le **dessin de détail**, une fois sur MOODLE et une fois sur GOOGLEDRIVE.

Mercredi 24 mai 2023 de 10h15 à 14h, défense finale publique :

Défense finale de tout le groupe devant les assistants et une partie le classe. L'horaire de passage, ainsi que la durée et autres modalités de la défense seront communiquées via MOODLE une semaine avant la soutenance. La défense sera évaluée selon les critères suivants :

- Clarté, pertinence et concision de la présentation
- Connaissance générale du problème
- Réponse aux questions
- Bonne coordination du groupe
- Un bonus est attribué aux solutions particulièrement originales
- Un bonus est attribué aux éventuelles maquettes didactiques ou aux animations vidéo présentées lors de la soutenance

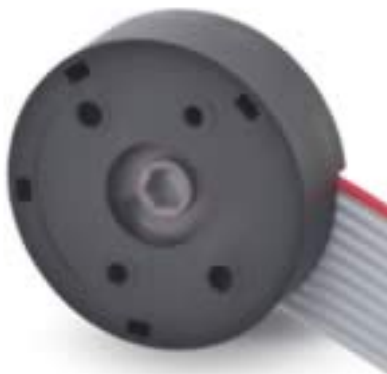
Barème

Calcul de la note N du cours *Conception de mécanismes II* : $N = 0,4 \cdot T + 0,2 \cdot I + 0,4 \cdot F$ où T est la note obtenue au travail écrit, I est la note obtenue au rendu intermédiaire et F est la note obtenue au rendu final du projet.

Assistant responsable de la coordination du projet : M. Hubert Schneegans, hubert.schneegans@epfl.ch.
Assistant responsable des questions techniques : Dr Florent Cosandier, florent.cosandier@epfl.ch.

ANNEXES

Encoder MR, Type ML, 512 CPT, 3 Channels, with Line Driver
Part number 201940



General information

Counts per turn	512
Number of channels	3
Line Driver	Yes
Max. mechanical speed	37500 rpm

Technical Data

Supply voltage Vcc	4.7...5.25 V
Output signal	TTL
Driver used logic	TTL
Output current per channel	0...5 mA
Phase shift	90 °e
Phase shift, inaccuracy	45 °e
Index synchronized to AB	Yes
Max. moment of inertia of code wheel	0.09 gcm ²
Operating temperature	-25...+85 °C

Fig. 3 : Specifications encodeur

EC-max 16 Ø16 mm, brushless, 5 Watt, with Hall sensors
 Part number 283825



Values at nominal voltage

Nominal voltage	4.5 V
No load speed	12800 rpm
No load current	148 mA
Nominal speed	5170 rpm
Nominal torque (max. continuous torque)	3.33 mNm
Nominal current (max. continuous current)	1.18 A
Stall torque	5.82 mNm
Stall current	1.89 A
Max. efficiency	54 %

Characteristics

Terminal resistance	2.38 Ω
Terminal inductance	0.0396 mH
Torque constant	3.08 mNm/A
Speed constant	3100 rpm/V
Speed / torque gradient	2390 rpm/mNm
Mechanical time constant	10.7 ms
Rotor inertia	0.428 gcm ²

Thermal data

Thermal resistance housing-ambient	23.5 K/W
Thermal resistance winding-housing	2.57 K/W
Thermal time constant winding	0.943 s
Thermal time constant motor	390 s
Ambient temperature	-40...+100 °C
Max. winding temperature	+155 °C

Mechanical data

Bearing type	ball bearings
Max. speed	20000 rpm
Axial play	0 mm, at radial load < 1.5 N 0.14 mm, at radial load > 1.5 N
Max. axial load (dynamic)	1 N
Max. force for press fits (static)	18 N
(static, shaft supported)	600 N
Max. radial load	6 N, 5 mm from flange

Other specifications

Number of pole pairs	1
Number of phases	3
Number of autoclave cycles	0

Product

Weight	36 g
--------	------

Fig. 4 : Specifications moteur

Planetary Gearhead GP 16 A Ø16 mm, 0.1 - 0.3 Nm, Metal Version, Ball Bearing
Part number 138337



General information

Gearhead type	GP
Outer diameter	16 mm
Version	Standard version

Gearhead Data

Reduction	29 : 1
Absolute reduction	729/25
Max. motor shaft diameter	1.5 mm
Number of stages	2
Max. continuous torque	0.15 Nm
Max. intermittent torque	0.225 Nm
Direction of rotation, drive to output	=
Max. efficiency	81 %
Average backlash no load	1.6 °
Mass inertia	0.04 gcm ²
Gearhead length (L1)	19.1 mm
Max. transmittable power (continuous)	4.3 W
Max. transmittable power (intermittent)	6.5 W

Technical Data

Bearing at output	ball bearing
Radial play	max. 0.08 mm, 6 mm from flange
Axial play	0 - 0.05 mm
Max. radial load	15 N, 6 mm from flange
Max. axial load (dynamic)	8 N
Max. force for press fits	25 N
Max. continuous input speed	8000 rpm
Max. intermittent input speed	8000 rpm
Recommended temperature range	-40...+100 °C
Number of autoclave cycles	0

Product

Weight	23 g
--------	------

Fig. 5 : Specifications réducteur



Fig. 6 : Dimensions de la sonde en tungsten.

