

Commande d'un stabilisateur cardiaque actionné par effet gyroscopique

J. Gagne*, É. Laroche, O. Piccin, J. Gangloff
Université de Strasbourg

Journées GT CPNL-MOSAR, LIRMM, Montpellier

22 janvier 2010



Sommaire

① Introduction

Contexte médical
Historique
Principe

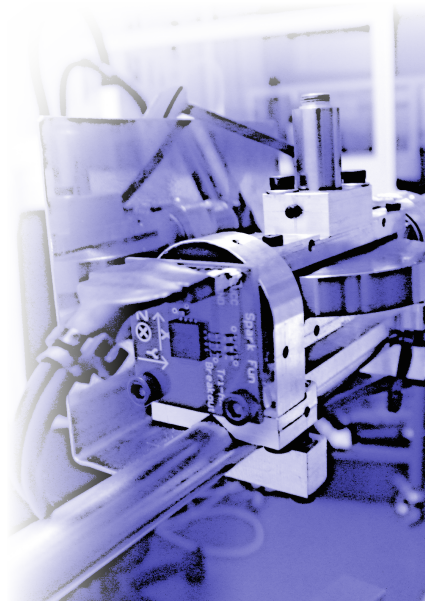
② Système

Modèle
Dispositif expérimental

③ Commande

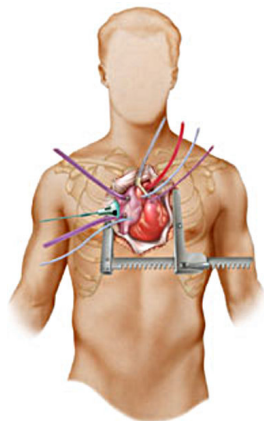
Observateur
Lois de commande
Comparaison
Simulations

④ Conclusion



Chirurgie cardiaque = invasif

- Pontage coronarien: opération commune mais très invasive
 - **étapes très invasives**: sternotomie, écartement de la cage thoracique, circulation extracorporelle (CEC)
 - **conséquences lourdes**: cicatrices, durée d'hospitalisation, risque infectieux



Chirurgie cardiaque = invasif

- Pontage coronarien: opération commune mais très invasive
 - **étapes très invasives:** sternotomie, écartement de la cage thoracique, circulation extracorporelle (CEC)
 - **conséquences lourdes:** cicatrices, durée d'hospitalisation, risque infectieux
- **Solution:** chirurgie mini invasive à cœur battant
 - les techniques mini invasives ont fait leurs preuves dans d'autres domaines
 - les principales causes de risque seraient éliminées (CEC, grandes incisions)



Chirurgie cardiaque = invasif

- Pontage coronarien: opération commune mais très invasive
 - **étapes très invasives:** sternotomie, écartement de la cage thoracique, circulation extracorporelle (CEC)
 - **conséquences lourdes:** cicatrices, durée d'hospitalisation, risque infectieux
- **Solution:** chirurgie mini invasive à cœur battant
 - les techniques mini invasives ont fait leurs preuves dans d'autres domaines
 - les principales causes de risque seraient éliminées (CEC, grandes incisions)
- **Principal obstacle:** les mouvements du cœur.



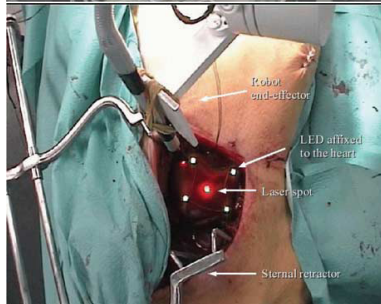
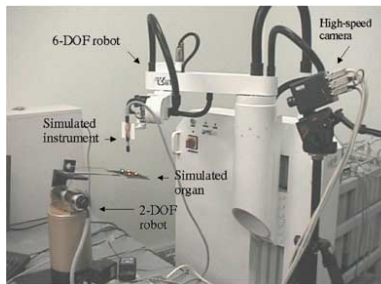
Suivi du mouvement

Principe

- destiné à la téléopération
- principe utilisé pour compenser la respiration
- le robot esclave suit les mouvements du cœur
- la zone d'intérêt est immobile aux yeux du chirurgien qui téléopère le robot

Inconvénients

- les dynamiques du cœur sont importantes
- nécessité d'utiliser un robot capable de générer des efforts importants
- risque potentiel pour le patient



L'approche de la stabilisation cardiaque

Stabilisation passive

- stabilisateur passif : tige rigide maintenant le cœur
- mouvement résiduel dû à la flexibilité : 1 mm contre 0.1 mm de précision nécessaire



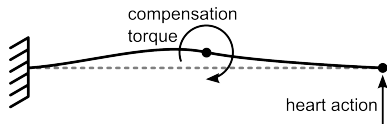
L'approche de la stabilisation cardiaque

Stabilisation passive

- stabilisateur passif : tige rigide maintenant le cœur
- mouvement résiduel dû à la flexibilité : 1 mm contre 0.1 mm de précision nécessaire



Stabilisation active : compenser en temps réel les déformations afin d'immobiliser la zone d'intérêt.



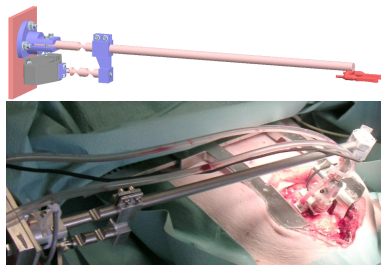
L'approche de la stabilisation cardiaque

Stabilisation passive

- stabilisateur passif : tige rigide maintenant le cœur
- mouvement résiduel dû à la flexibilité : 1 mm contre 0.1 mm de précision nécessaire

Stabilisation active : compenser en temps réel les déformations afin d'immobiliser la zone d'intérêt.

- stabilisateur spécifique
- actionnement intégré



Solution proposée

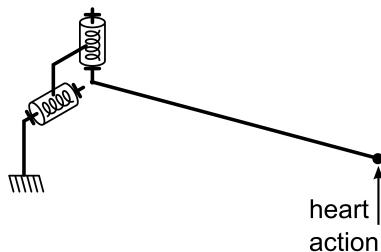
La solution développée

- assurer la stabilisation active
- en utilisant un système indépendant
- connecté à un stabilisateur standard
- capable de générer des couples
- sans lien au sol grâce à l'effet gyroscopique

Modèle mécanique

Modèle du système

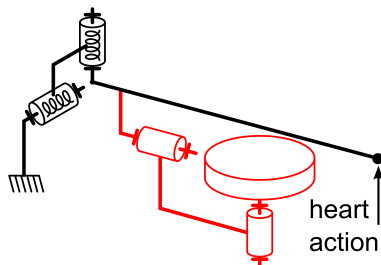
- Stabilisateur passif avec ses flexibilités



Modèle mécanique

Modèle du système

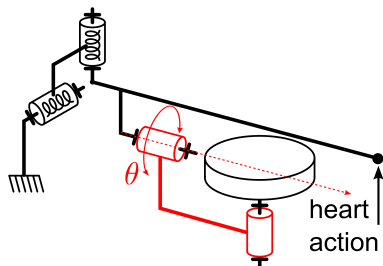
- Stabilisateur passif avec ses flexibilités
- **Système gyroscopique**



Modèle mécanique

Modèle du système

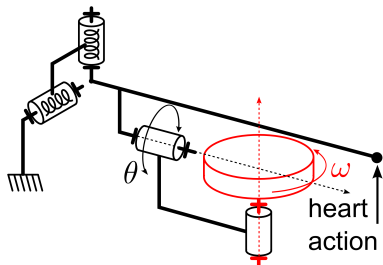
- Stabilisateur passif avec ses flexibilités
- Système gyroscopique
 - Étrier actionné en rotation avec un angle θ



Modèle mécanique

Modèle du système

- Stabilisateur passif avec ses flexibilités
- Système gyroscopique
 - Étrier actionné en rotation avec un angle θ
 - Gyroscopie tournant à une vitesse Ω élevée



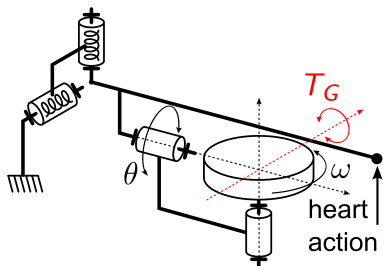
Modèle mécanique

Modèle du système

- Stabilisateur passif avec ses flexibilités
- Système gyroscopique
 - Étrier actionné en rotation avec un angle θ
 - Gyroscop tournant à une vitesse Ω élevée

Interprétation

- I_G et Ω sont constants
- Le couple peut être contrôlé à partir de la vitesse de l'étrier $\dot{\theta}$ pour compenser l'action cardiaque



Couple gyroscopique

$$T_G = I_G \cdot \dot{\theta} \cdot \Omega$$

Conception

Le prototype conçu

- est capable de fournir un couple suffisant pour compenser les efforts cardiaques (5 N à 1,5 Hz)
- est optimisé en taille (13 cm de long) et en poids (390 g), actionneurs et capteur inclus

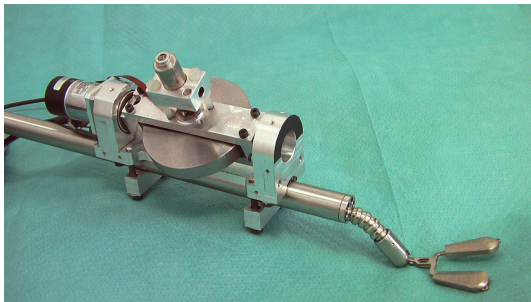


Figure: Système gyroscopique monté sur un stabilisateur passif de chez Medtronic

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

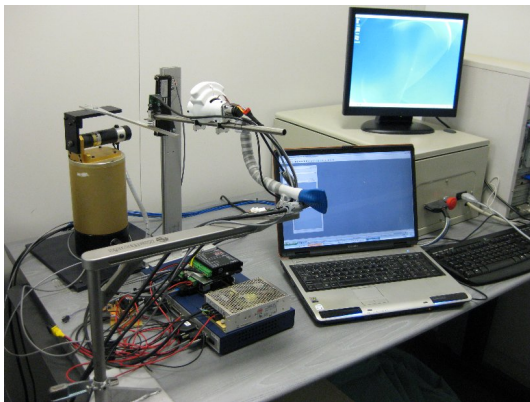


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

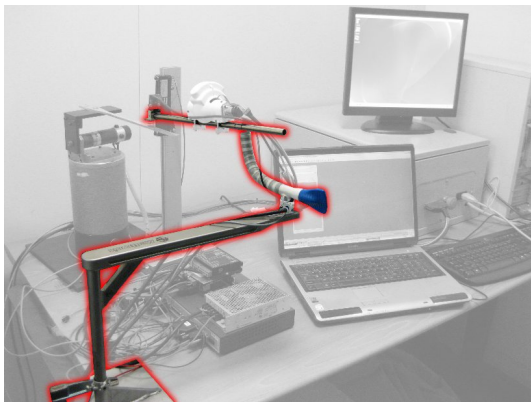


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- **Système gyroscopique**
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

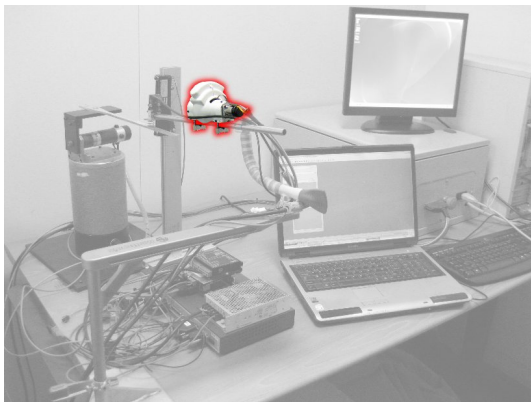


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- **Accéléromètre**
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

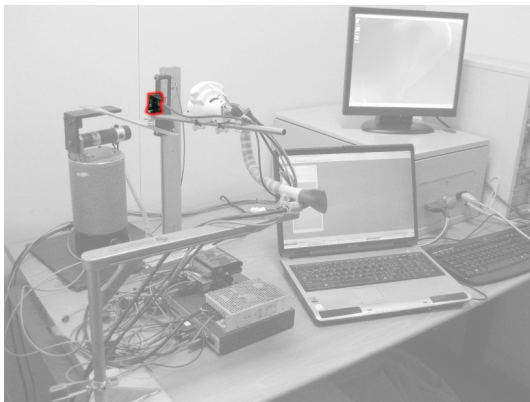


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- **Simulateur de mouvement cardiaque**
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

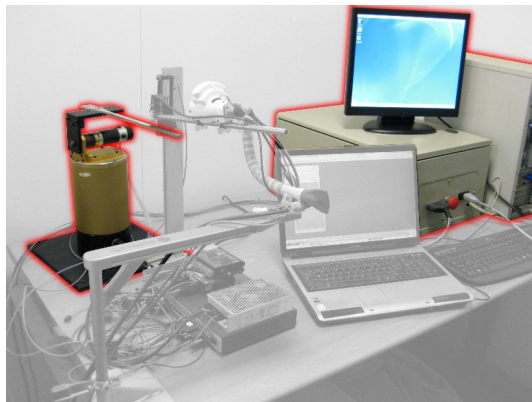


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

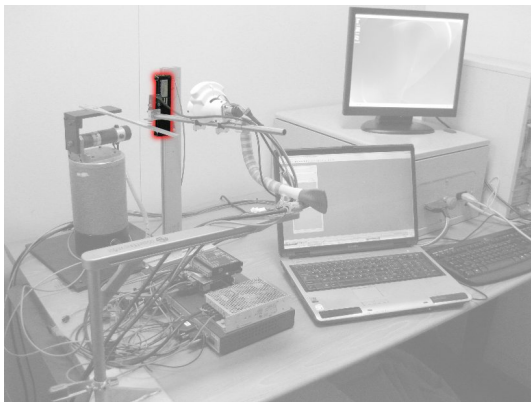


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- **Contrôleur temps-réel**
- Supervision connectée au contrôleur par firewire

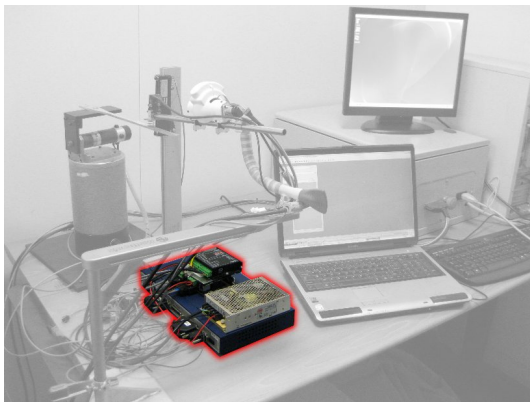


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Dispositif expérimental

- Stabilisateur passif
- Système gyroscopique
- Accéléromètre
- Simulateur de mouvement cardiaque
- Capteur de position donnant une mesure témoin
- Contrôleur temps-réel
- **Supervision connectée au contrôleur par firewire**

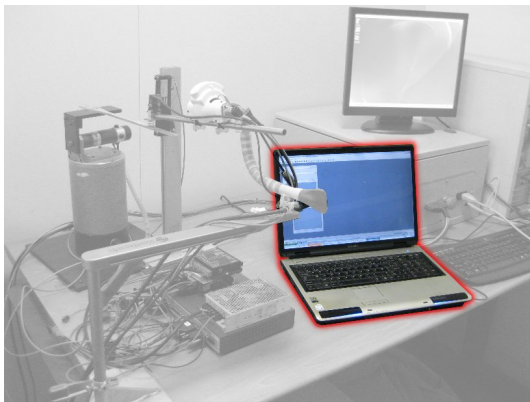


Figure: Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Mise en place d'un observateur

- Les mesures disponibles sur le système sont limitées :
 - **Accélération** \ddot{y} , très bruitée à cause de l'excitation vibratoire du gyroscope.
 - **Angle de l'étrier** θ .

Mise en place d'un observateur

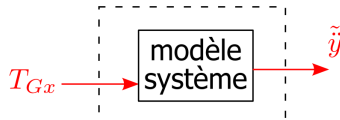
- Les mesures disponibles sur le système sont limitées :
 - **Accélération** \ddot{y} , très bruitée à cause de l'excitation vibratoire du gyroscope.
 - **Angle de l'étrier** θ .
- La mise en place d'un observateur de Kalman permet :
 - de **filtrer** le bruit de mesure sur l'accélération ;
 - d'**estimer** les états du système en vue de la commande.

Mise en place d'un observateur

- Les mesures disponibles sur le système sont limitées :
 - **Accélération** \ddot{y} , très bruitée à cause de l'excitation vibratoire du gyroscope.
 - **Angle de l'étrier** θ .
- La mise en place d'un observateur de Kalman permet :
 - de **filtrer** le bruit de mesure sur l'accélération ;
 - d'**estimer** les états du système en vue de la commande.
- L'intégration d'un **modèle de perturbation**
 - permet de prendre en compte la connaissance du contenu fréquentiel de la perturbation ;
 - permet d'estimer la perturbation.

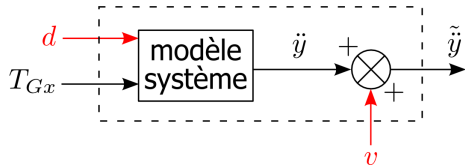
Observateur avec modèle de perturbation

- Le système est commandé grâce au couple T_{Gx} et l'accélération \tilde{y} est mesurée
- On considère la perturbation cardiaque d en entrée du système et un bruit de mesure v sur la sortie
- La perturbation est la somme de n bruits de perturbation w_i filtrés avec des filtres résonant aux harmoniques cardiaques ω_i .



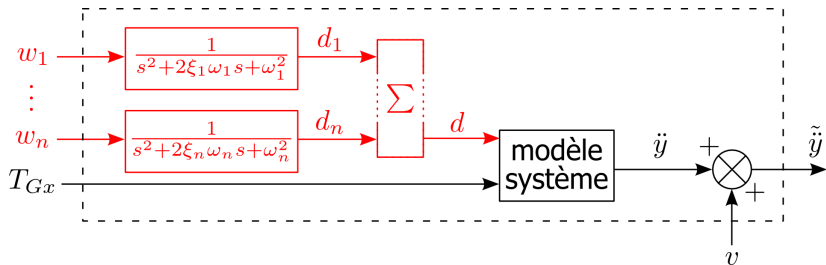
Observateur avec modèle de perturbation

- Le système est commandé grâce au couple T_{Gx} et l'accélération \ddot{y} est mesurée
- On considère la perturbation cardiaque d en entrée du système et un bruit de mesure v sur la sortie
- La perturbation est la somme de n bruits de perturbation w_i filtrés avec des filtres résonant aux harmoniques cardiaques ω_i .

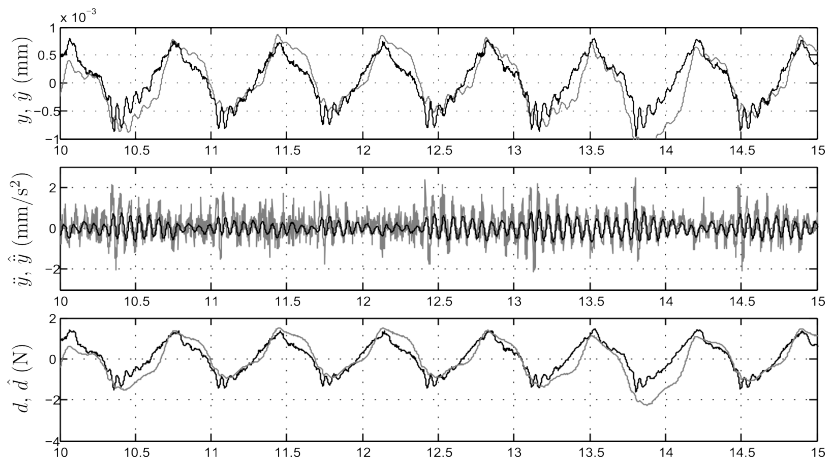


Observateur avec modèle de perturbation

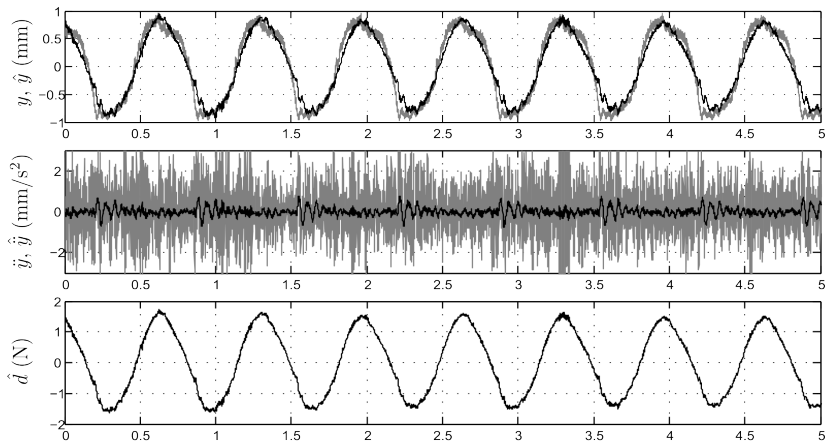
- Le système est commandé grâce au couple T_{Gx} et l'accélération \ddot{y} est mesurée
- On considère la perturbation cardiaque d en entrée du système et un bruit de mesure v sur la sortie
- La perturbation est la somme de n bruits de perturbation w_i filtrés avec des filtres résonant aux harmoniques cardiaques ω_i .



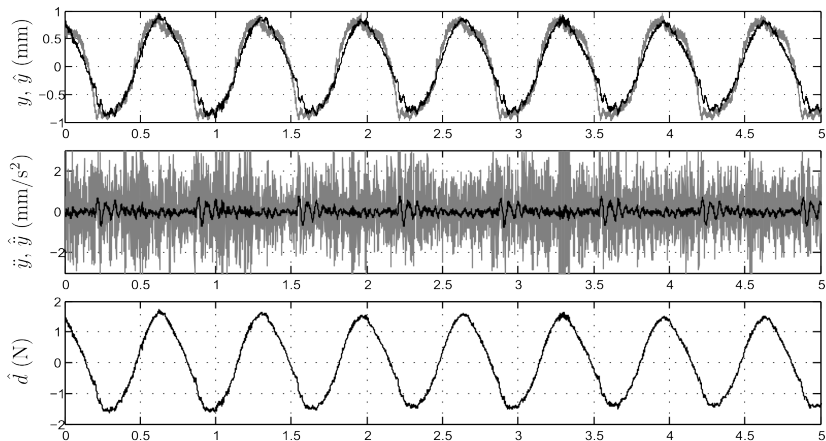
Résultats de simulation



Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux



Objectifs

- La loi de commande doit répondre à un double objectif :
 - 1 **Rejeter la perturbation** et maintenir la position y constante ou la vitesse \dot{y} nulle.
 - 2 **Maintenir l'étrier proche de sa configuration de référence** pour éviter une déviation de la direction du couple.

Objectifs

- La loi de commande doit répondre à un double objectif :
 - ① **Rejeter la perturbation** et maintenir la position y constante ou la vitesse \dot{y} nulle.
 - ② **Maintenir l'étrier proche de sa configuration de référence** pour éviter une déviation de la direction du couple.
- **Ces objectifs sont conflictuels** étant donné que la rotation de l'étrier est nécessaire à la génération de couple. La 2^e contrainte empêche la compensation des perturbations en basse fréquence.

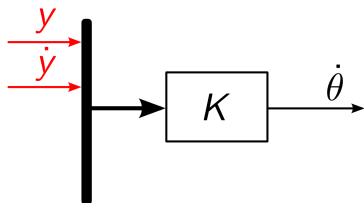
Objectifs

- La loi de commande doit répondre à un double objectif :
 - ① **Rejeter la perturbation** et maintenir la position y constante ou la vitesse \dot{y} nulle.
 - ② **Maintenir l'étrier proche de sa configuration de référence** pour éviter une déviation de la direction du couple.
- **Ces objectifs sont conflictuels** étant donné que la rotation de l'étrier est nécessaire à la génération de couple. La 2^e contrainte empêche la compensation des perturbations en basse fréquence.
- Un compromis doit être trouvé :
 - Le système ne compense pas les perturbations en basses fréquences dues à la respiration
 - il compense les perturbations cardiaques de fréquences plus élevées

Commande par retour d'état

La vitesse de rotation de l'étrier est commandée par un retour sur:

- la position y et la vitesse \dot{y} estimées pour le rejet de perturbation
- l'angle d'étrier θ pour empêcher la dérive
- l'intégrale de l'angle I_θ pour maintenir l'étrier autour de 0



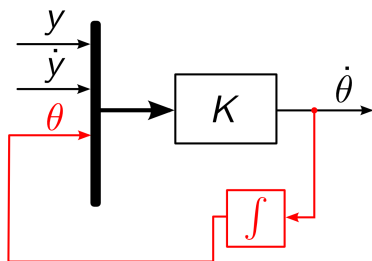
Control law

$$\dot{\theta} = K_1 y + K_2 \dot{y}$$

Commande par retour d'état

La vitesse de rotation de l'étrier est commandée par un retour sur:

- la position y et la vitesse \dot{y} estimées pour le rejet de perturbation
- l'angle d'étrier θ pour empêcher la dérive
- l'intégrale de l'angle $\int \theta$ pour maintenir l'étrier autour de 0



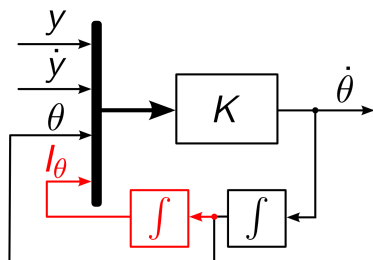
Control law

$$\dot{\theta} = K_1 y + K_2 \dot{y} + K_3 \theta$$

Commande par retour d'état

La vitesse de rotation de l'étrier est commandée par un retour sur:

- la position y et la vitesse \dot{y} estimées pour le rejet de perturbation
- l'angle d'étrier θ pour empêcher la dérive
- l'intégrale de l'angle I_θ pour maintenir l'étrier autour de 0



Control law

$$\dot{\theta} = K_1 y + K_2 \dot{y} + K_3 \theta + K_4 I_\theta$$

Réglage des paramètres

- Les gains de retour d'état sont obtenus grâce à une synthèse LQ qui minimise :

$$\int_0^{\infty} X^T Q X + U^T R U dt$$

avec $X = [y \dot{y} \theta l_{\theta}]$ et

$$Q = \text{diag}([p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4])$$

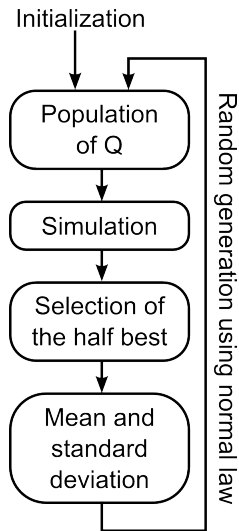
Réglage des paramètres

- Les gains de retour d'état sont obtenus grâce à une synthèse LQ qui minimise :

$$\int_0^{\infty} X^T Q X + U^T R U dt$$

avec $X = [y \ \dot{y} \ \theta \ l_{\theta}]$ et
 $Q = \text{diag}([p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4])$

- Les pondérations p_i sont optimisées grâce à un algorithme stochastique d'optimisation basé sur l'adaptation gaussienne.

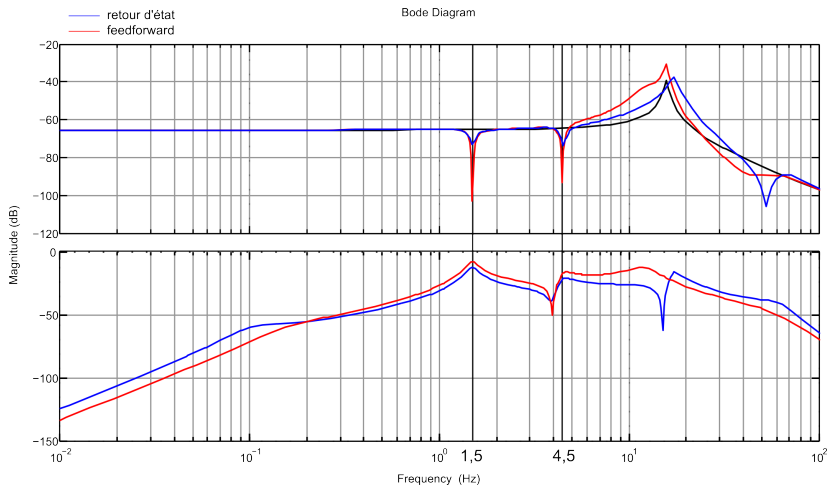


Commande par feedforward

- Connaissant la perturbation, il est possible de la rejeter parfaitement dans le cas d'un système de la forme $y = F(Gd + Hu)$ en appliquant la commande $u = -H^{-1}Gd$.
- Dans notre cas :
 - G et H sont de simples gains donc $-H^{-1}G$ aussi
 - on peut exploiter l'estimation de la perturbation \hat{d}
- Il est toujours nécessaire d'inclure un retour sur θ et l_θ pour supprimer les dérives de l'étrier

$$u = K_1 \hat{d} + K_2 \theta + K_3 l_\theta$$

Transferts en boucle fermée

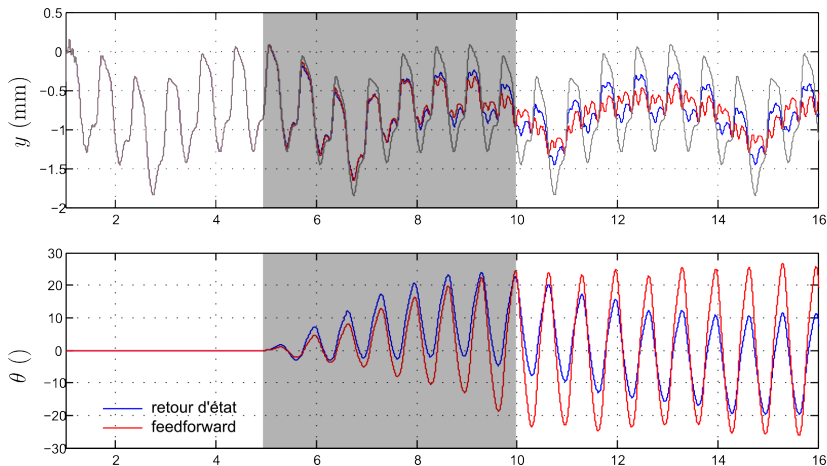


Conditions de simulation

Conditions

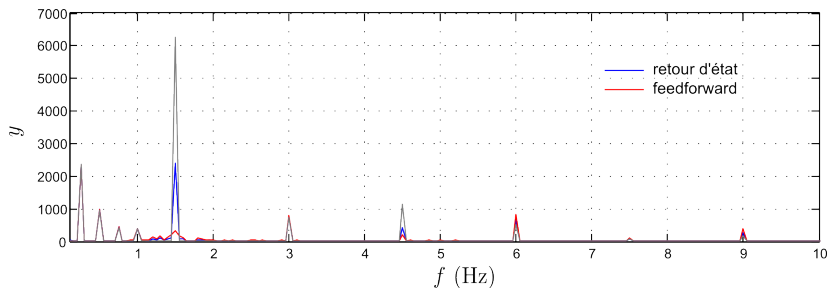
- Le gyroscope tourne à $\Omega = 30\,000$ tr/min
- Un observateur incluant un modèle de perturbation à 2 harmoniques est mis en place.
- Les deux lois de commande sont implémentées, basées sur les estimations fournies par l'observateur.
- On utilise comme perturbation :
 - 1 un profil cardiaque de synthèse incluant les harmoniques respiratoires et les 6 premiers harmoniques cardiaques
 - 2 un enregistrement des efforts cardiaques réalisé *in vivo*

Perturbation de synthèse : déplacement et angle d'étrier



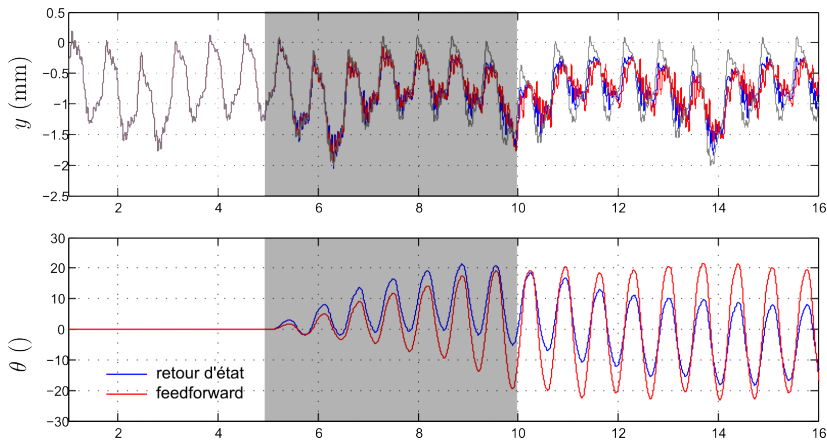
- Retour d'état : -58%, feedforward : -76% pour $f > 1$ Hz.
- $\theta < 30^\circ$

Perturbation de synthèse : décomposition fréquentielle



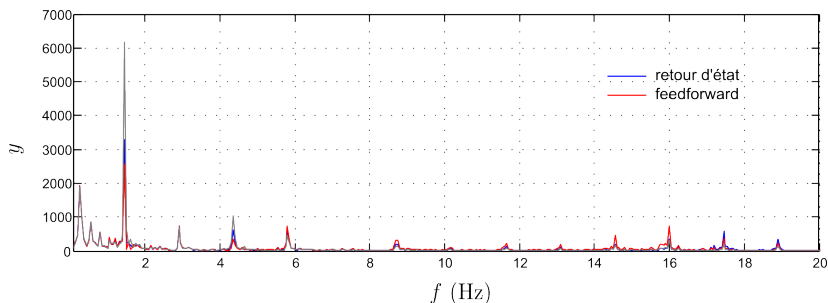
- Le rejet de la perturbation est effectif pour les harmoniques sélectionnés
- Le feedforward présente de meilleurs résultats mais est plus sensible aux plus hautes fréquences

Perturbation réelle : déplacement et angle d'étrier



- Retour d'état : -39%, feedforward : -45% pour $f > 1$ Hz.
- $\max\theta < 20^\circ$

Perturbation réelle : décomposition fréquentielle



- Le rejet de la perturbation est effectif pour les harmoniques sélectionnés mais moins marqué
- L'avantage du feedforward est moindre et sa sensibilité aux harmoniques supérieurs est confirmée

Conclusions and perspectives

Conclusions

- La mise en place d'un observateur permet le filtrage des bruits de mesure d'origine mécanique et la reconstruction des états du système et de la perturbation.
- Le fonctionnement de l'observateur a été testé en simulation et expérimentalement.
- La commande par retour d'état ne permet pas un rejet complet de la perturbation.
- La solution du feedforward rejette de manière plus efficace la perturbation mais est plus sensible aux hautes fréquences.
- On observe une détérioration des performance lorsque la perturbation comporte des harmoniques de rang plus élevé.

Conclusions and perspectives

Suite des travaux

- Possibilité d'augmenter le nombre d'harmoniques pris en compte.
- Intégrer une estimation de la fréquence cardiaque.
- Améliorer la robustesse.
- Valider leur fonctionnement expérimentalement, sur simulateur et *in vivo*.