

Commande par vision d'un endoscope flexible pour la chirurgie transminale - Compensation des mouvements physiologiques

Laurent Ott, Florent Nageotte, Philippe Zanne, Michel de Mathelin
LSiIT - Université de Strasbourg

Journées GT CPNL-MOSAR

22 janvier 2010

Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Commande pour le rejet de perturbations périodiques
- 3 Adaptation aux changements de profondeur
- 4 Rejet de perturbations non périodiques
- 5 Conclusions

Plan de la présentation

- 1 Introduction
 - Contexte Médical
 - Réalisation d'un prototype
 - Asservissement visuel
- 2 Commande pour le rejet de perturbations périodiques
- 3 Adaptation aux changements de profondeur
- 4 Rejet de perturbations non périodiques
- 5 Conclusions

Endoscopie flexible



Description du matériel

- Corps souple non commandé (1 mètre)
- Extrémité (10 cm) orientable selon 2 directions orthogonales
- 2 molettes concentriques
- Système optique (caméra CCD)
- 1 ou plusieurs canaux opérateurs

Observations

- Diagnostics et traitements dans le tube digestif
- **Nouveau champ d'application**
⇒ **Chirurgie transluminale**

Chirurgie transluminale

But

Traitement des organes de la cavité abdominale



Principe

- Utilisation d'un endoscope flexible
- Orifices et conduits naturels
- Incision d'une paroi interne
- Utilisation de micro-instruments au travers de l'endoscope

Problématiques

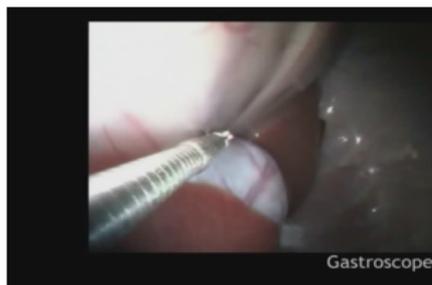
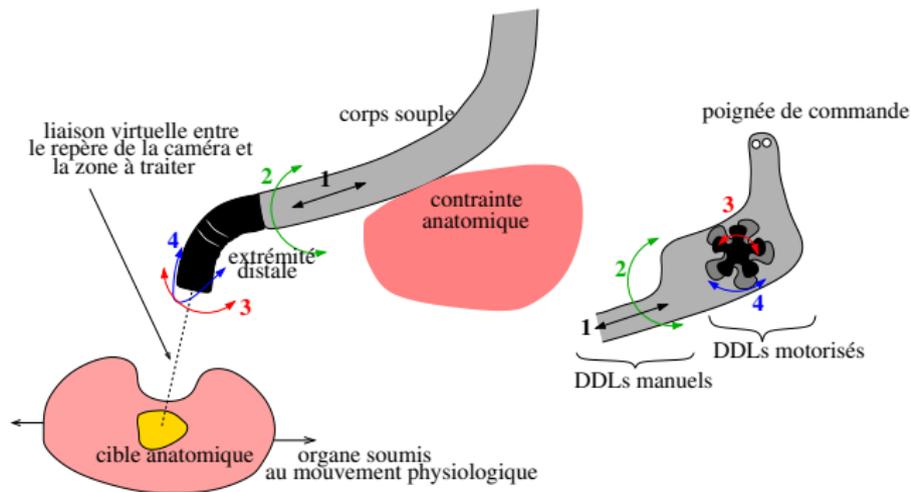


- Manipulation complexe
 - Nombre de mobilités élevé
 - Interface peu intuitive
- Coopération entre plusieurs praticiens
- Mouvements physiologiques

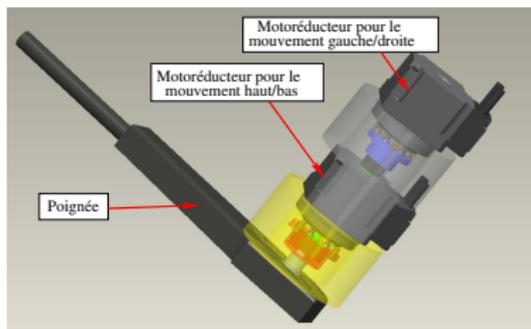
Assistance robotique

Stabilisation active de l'endoscope flexible sur la zone de travail

Principe de la stabilisation



Motorisation des 2 degrés de liberté de l'extrémité distale



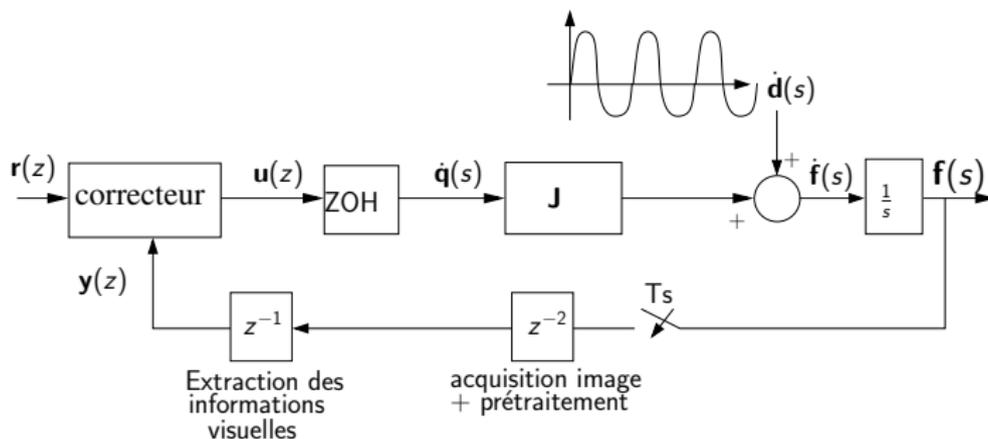
Contraintes

- Couple nécessaire 0,79 Nm
- Préserver l'étanchéité de la poignée
- Minimiser les jeux

Réalisation

- Moteurs à arbre creux
- Transmission directe sans engrenage

Asservissement visuel 2D

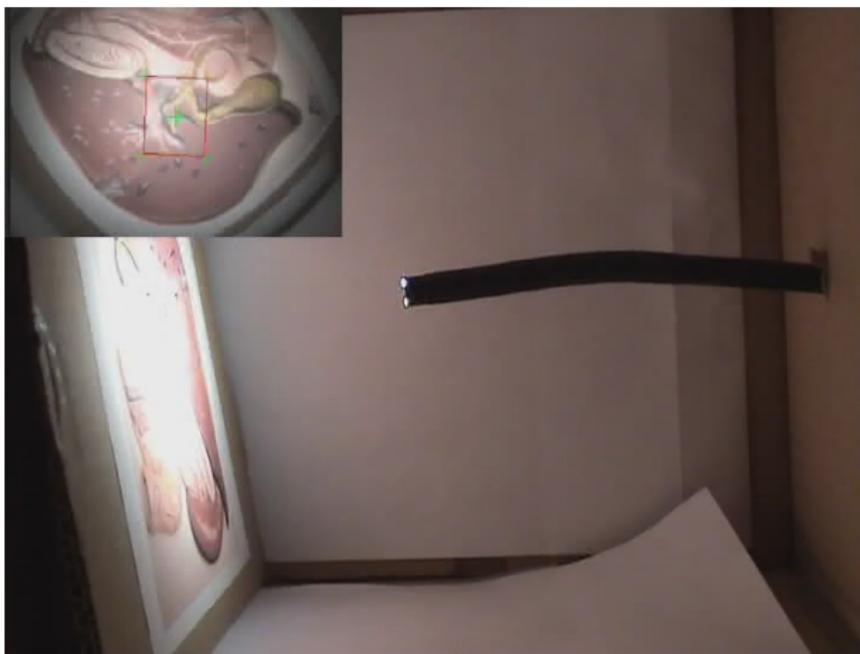


Modélisation

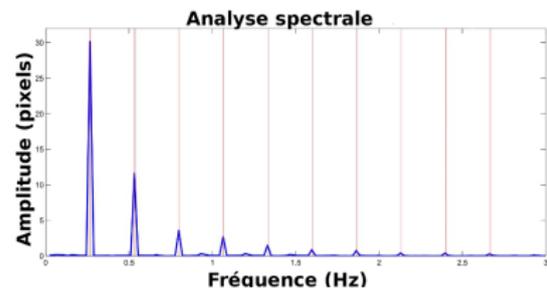
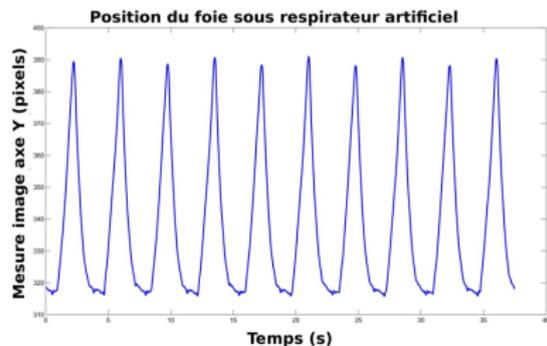
Fonction de transfert de la boucle ouverte du système

$$P(z^{-1}) = \frac{y(z)}{u(z)} = J \frac{T_s z^{-4}}{1 - z^{-1}} \text{ avec } T_s = 0,04s$$

Asservissement visuel



Analyse du mouvement physiologique



Analyse

- Organes de la cavité abdominale soumis au mouvement respiratoire
- Patient anesthésié sous respiration artificielle
⇒ mouvement parfaitement périodique ($T_p = NT_s$)
- Harmoniques significatives allant jusqu'à 3 Hz
- Faible bande passante du capteur (fréq Nyquist 12,5 Hz) ⇒ Correcteur PID insuffisant

Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 **Commande pour le rejet de perturbations périodiques**
 - Commande prédictive généralisée Répétitive (R-GPC)
 - Correcteur répétitif : PRC
 - Analyse de robustesse et performance
 - Expérimentations
- 3 Adaptation aux changements de profondeur
- 4 Rejet de perturbations non périodiques
- 5 Conclusions

Commande prédictive généralisée Répétitive (R-GPC)

Principe

■ Commandes futures minimisant \mathcal{J}

$$\mathcal{J}(\mathbf{u}, k) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \|\mathbf{r}(k+j) - \hat{\mathbf{y}}(k+j)\|^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \|\delta \mathbf{u}(k+j-1)\|^2$$

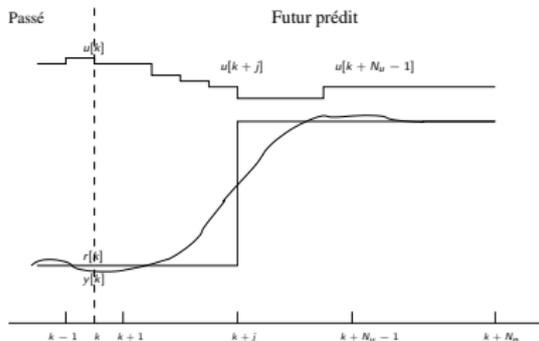
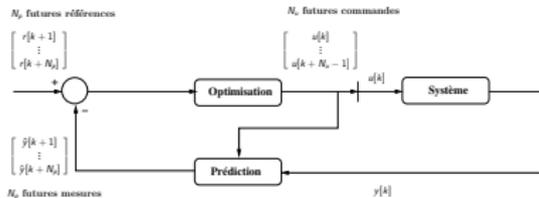
■ Prédiction à partir d'un modèle ARIMAX + un générateur de signaux périodiques :

$$\mathbb{A}(q^{-1})\mathbf{y}(k) = \mathbb{B}(q^{-1})\mathbf{u}(k-1) + \frac{\mathbb{C}(q^{-1})}{\delta(q^{-1})\Delta_R(q^{-1})}\xi(k)$$

■ avec $\delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ et $\Delta_R(q^{-1}) = 1 - q^{-N}$

■ Réglages

- Horizons de commande N_u , d'initialisation N_1 , de prédiction N_2
- Facteur de pondération de l'énergie de commande λ
- Dynamique de l'observateur de perturbation $\mathbb{C} = c(q^{-1})\mathbf{I}_{n \times n}$



Obtention du correcteur

- La prédiction à j pas d'échantillonnage en avance nécessite la résolution de 2 équations Diophantiennes :
 - Prédiction : $\mathbb{C} = \mathbb{E}_j \mathbb{A} \Delta_R \delta + q^{-j} \mathbb{F}_j$
 - Séparation en réponse libre/forcée : $\mathbb{E}_j \mathbb{B} \Delta_R = \mathbb{C} \mathbb{G}_j + q^{-j} \mathbb{H}_j$

$$\hat{\mathbf{y}}[k+j] = \overbrace{\mathbb{G}_j \delta \mathbf{u}[k+j-1]}^{\text{rép. forcée}} + \overbrace{\mathbb{C}^{-1} \left[\mathbb{H}_j \delta \mathbf{u}[k-1] + \mathbb{F}_j \mathbf{y}[k] \right]}^{\text{réponse libre r}}.$$

- Sous forme matricielle pour $N_i \leq j \leq N_p$
 $\hat{\mathbf{Y}} = \mathcal{G} \delta \mathbf{U} + \mathbf{f}$ et $J = (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{R})^T (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{R}) + \lambda \delta \mathbf{U}^T \delta \mathbf{U}$
- Solution optimale
 $\delta \mathbf{U}^* = (\mathcal{G}^T \mathcal{G} + \lambda I)^{-1} \mathcal{G}^T (\mathbf{R} - \mathbf{f}) = \mathbf{K} (\mathbf{R} - \mathbf{f})$

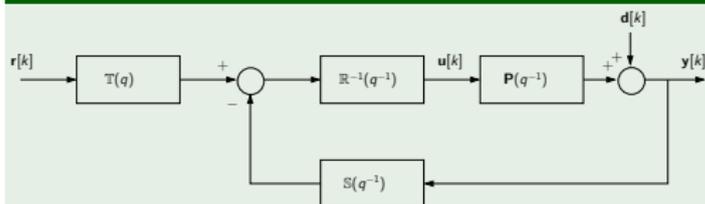
Loi de commande

- Seul le premier échantillon est appliqué au système

$$\delta \mathbf{u}[k] = \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{Q}} \mathbf{r}[k] - c^{-1} \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{H}} \delta \mathbf{u}[k-1] - c^{-1} \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{F}} \mathbf{y}[k]$$

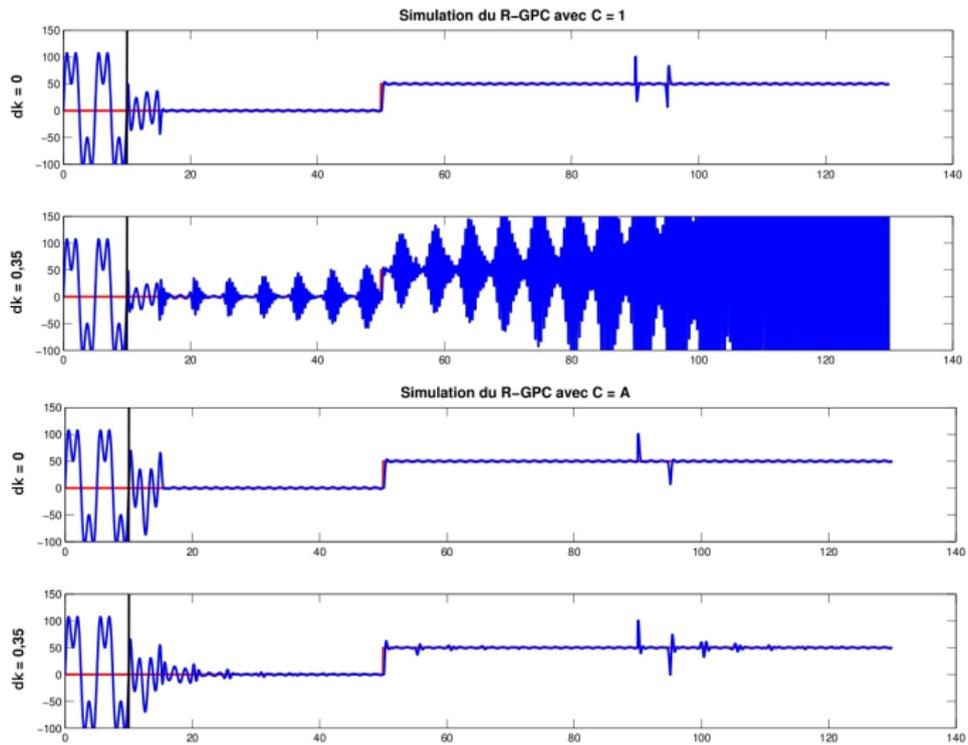
avec $\bar{\mathbf{K}} = [\mathbf{K}_{11} \dots \mathbf{K}_{1(N_p - N_i + 1)}]$, $\bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{N_i} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{N_p} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{N_i} \\ \vdots \\ \mathbf{K}_{N_p} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} q^{N_i} \mathbf{I}_{n \times n} \\ q^{N_i + 1} \mathbf{I}_{n \times n} \\ \vdots \\ q^{N_p} \mathbf{I}_{n \times n} \end{bmatrix}$

Forme RST



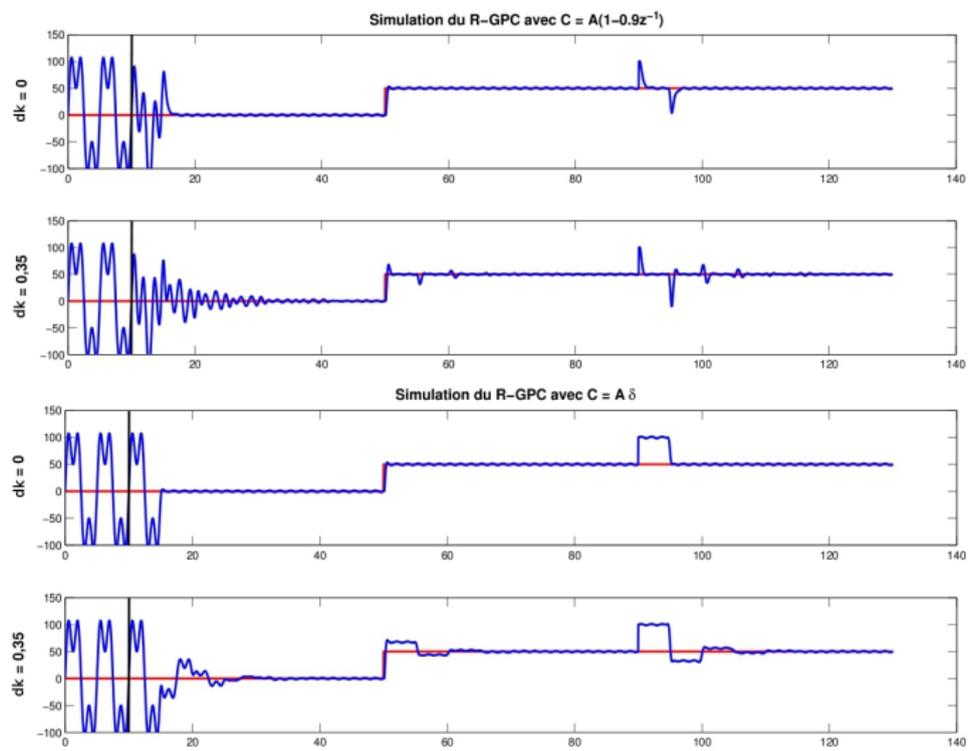
$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} &= (c \mathbf{I}_{m \times m} + q^{-1} \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{H}}) \delta \\
 \mathbf{S} &= \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{F}} \\
 \mathbf{T} &= c \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{Q}}
 \end{aligned}$$

Simulation du RGPC (1)



$$P = (1 + dk)\hat{P}$$

Simulation du RGPC (2)



$$P = (1 + dk)\hat{P}$$

Correcteur répétitif : *Prototype Repetitive Controller* (PRC)

Principe

- Loi de commande : $\mathbf{u}[k] = Q(q, q^{-1})(\mathbf{u}[k - N] + \mathbf{L}(q, q^{-1})\mathbf{e}[k - N])$
 - répète la commande de la période précédente
 - apprend à partir de l'erreur à la période précédente
- Fonction de transfert du PRC : $\mathbf{C}_r(z^{-1}) = \frac{Q(z, z^{-1})z^{-N}}{1 - Q(z, z^{-1})z^{-N}}\mathbf{L}(z, z^{-1})$
 - Contient un générateur de signal périodique (principe du modèle interne)
 - Gain élevé aux harmoniques de la perturbation.

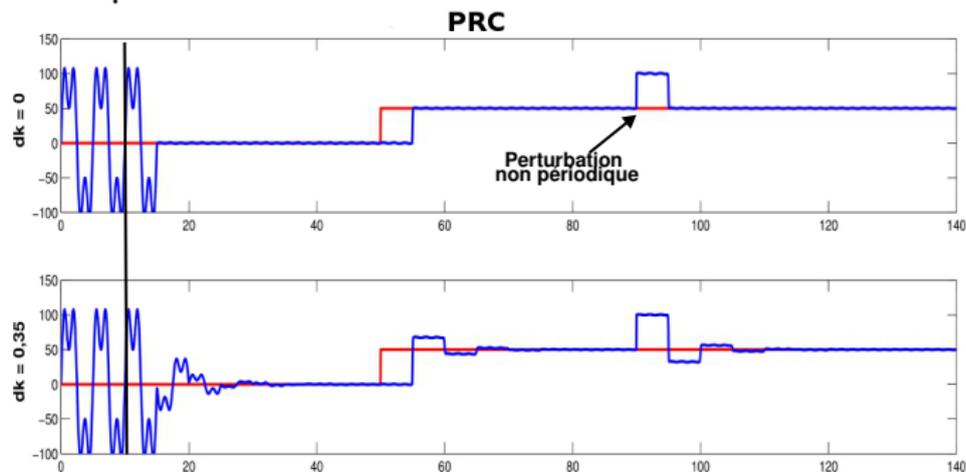
Réglages

- Pour notre système, $\mathbf{L}(z, z^{-1}) = \mathbf{P}^{-1}(z^{-1})$
- $Q(z, z^{-1})$: filtre passe-bas à déphasage nul de gain statique unitaire

Stabilité

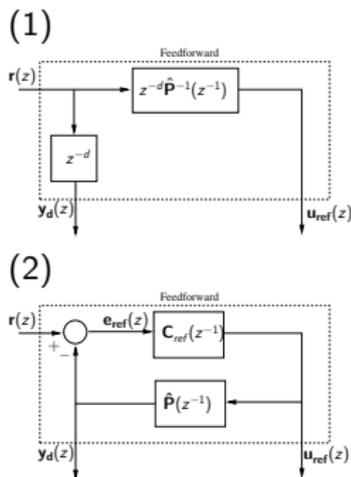
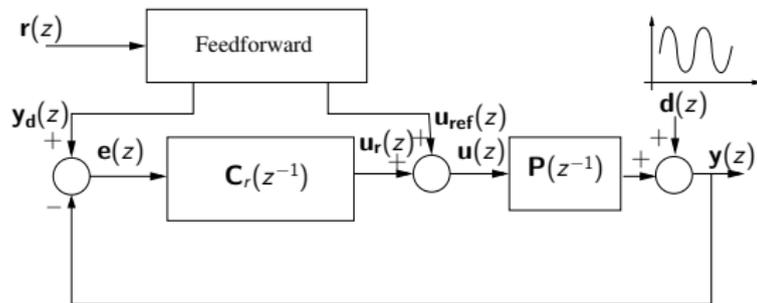
- $\left\| Q(z, z^{-1})z^{-N} \left(\mathbf{P}(z^{-1})\mathbf{L}(z, z^{-1}) - \mathbf{I} \right) \right\|_{\infty} < 1$

Simulation du PRC



$$P = (1 + dk)\hat{P}$$

PRC avec correcteur par anticipation

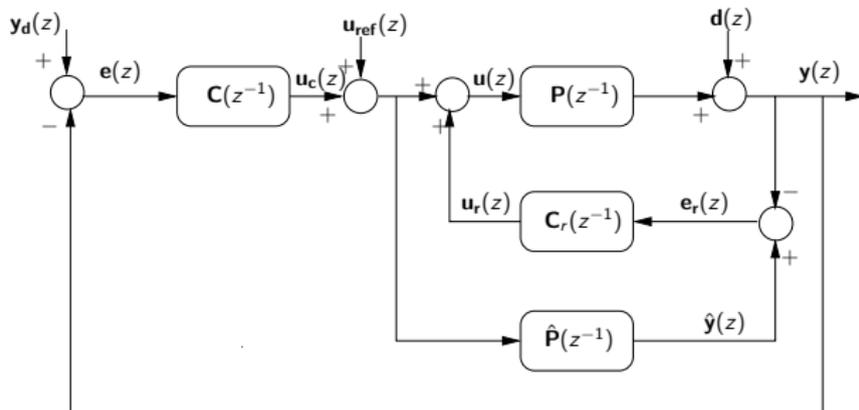


- Ne modifie pas les propriétés de l'asservissement en terme de stabilité
- Prise en compte immédiate de la consigne
- Si $\hat{\mathbf{P}} = \mathbf{P}$, la dynamique du suivi de consigne est indépendante de celle du rejet de perturbation.

$$(1) \mathbf{y}(z) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}\mathbf{C}_r]^{-1}\mathbf{d}(z) + z^{-d}\mathbf{r}(z),$$

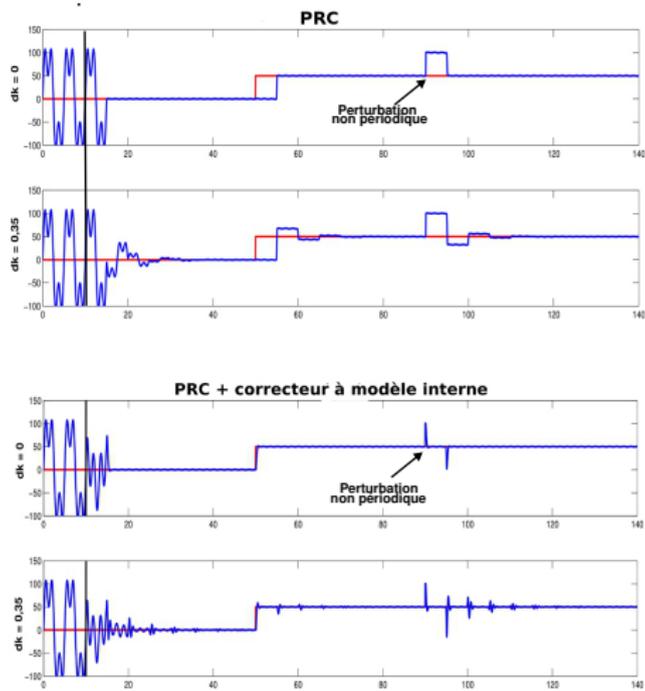
$$(2) \mathbf{y}(z) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}\mathbf{C}_r]^{-1}\mathbf{d}(z) + \mathbf{P}\mathbf{C}_{ref}[\mathbf{I} + \mathbf{P}\mathbf{C}_{ref}]^{-1}\mathbf{r}(z).$$

Rejet de perturbations non périodiques : PRC + correcteur à modèle interne



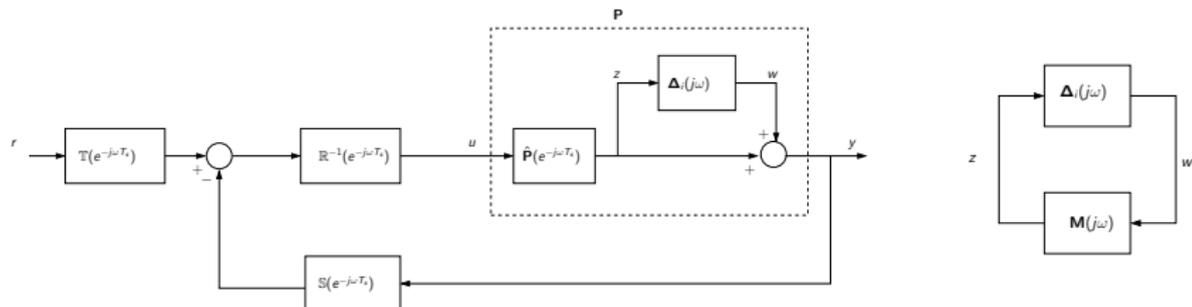
- Ajout du correcteur \mathbf{C} pour entreprendre immédiatement le rejet de perturbations non périodiques
- Utilisation d'un modèle du système $\hat{\mathbf{P}}$ pour ne pas perturber le fonctionnement du PRC
- Si $\hat{\mathbf{P}} = \mathbf{P}$, le signal d'erreur \mathbf{e}_r en entrée du PRC ne voit que \mathbf{d}
 $\mathbf{y}(z) = [(\mathbf{I} + \mathbf{P}\mathbf{C}_r)(\mathbf{I} + \mathbf{P}\mathbf{C})]^{-1}\mathbf{d}(z)$

Simulation



$$P = (1 + dk)\hat{P} \text{ et } C = 4$$

Robustesse aux incertitudes multiplicatives en sortie (1)



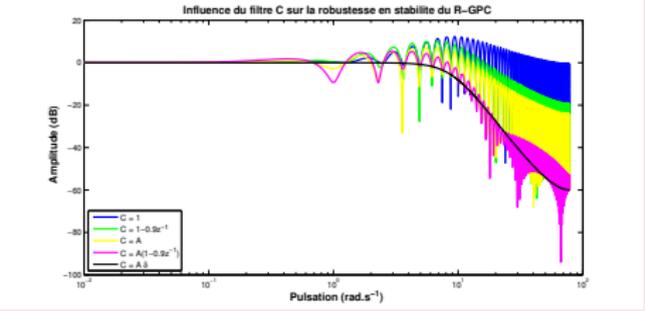
$$\mathbf{P} = (\mathbf{I} + \mathbf{\Delta}_i)\hat{\mathbf{P}} \iff \mathbf{\Delta}_i = \mathbf{P}\hat{\mathbf{P}}^{-1} - \mathbf{I}$$

Si $\mathbf{\Delta}_i$ et \mathbf{M} stables, alors le système bouclé demeure stable si

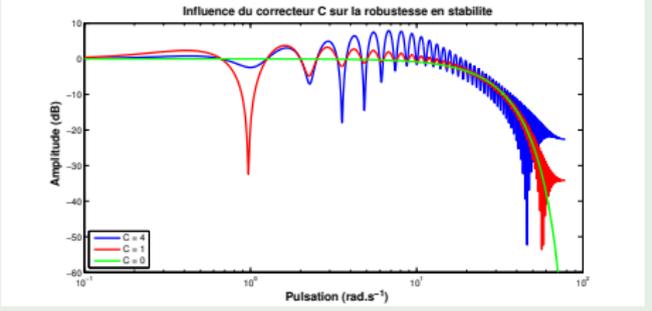
$$\bar{\sigma}(\mathbf{M}(j\omega))\bar{\sigma}(\mathbf{\Delta}_i(j\omega)) < 1 \quad \forall \omega$$

Robustesse aux incertitudes multiplicatives en sortie (2) : $\bar{\sigma}(\mathbf{M})$

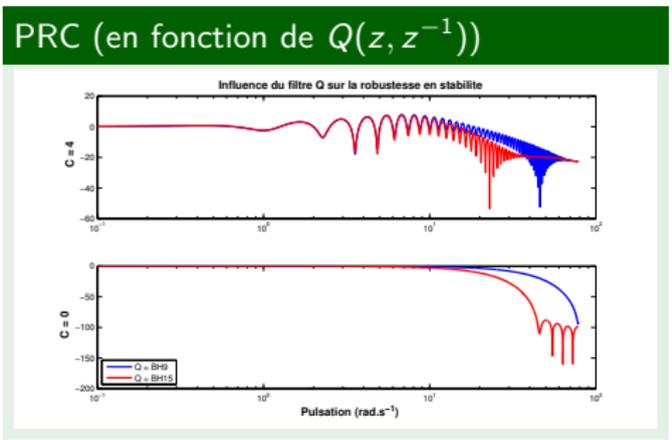
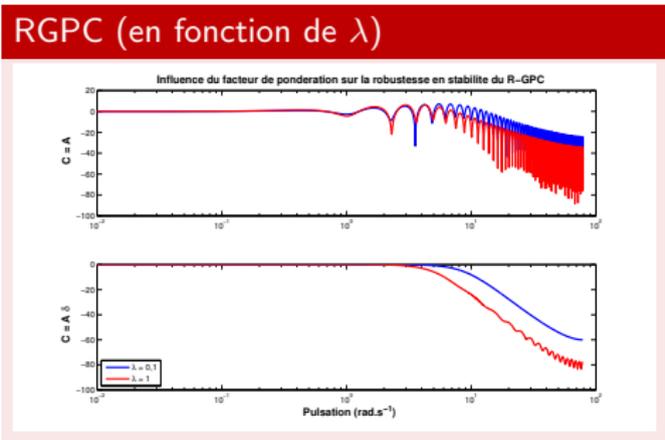
RGPC (en fonction de C)



PRC (en fonction de C)

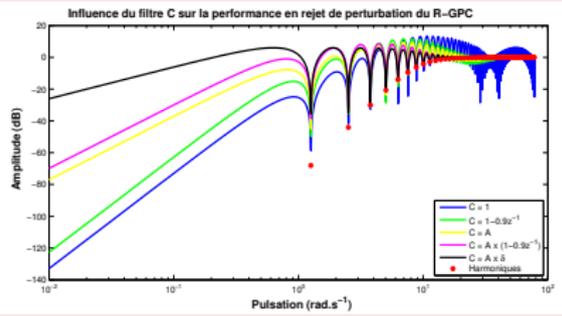


Robustesse aux incertitudes multiplicatives en sortie (3) : $\bar{\sigma}(\mathbf{M})$

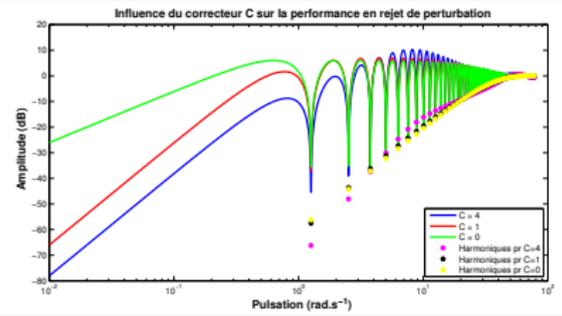


Performance en rejet de perturbations de sortie (1) : $\bar{\sigma}(\mathbf{T}_{yd})$

RGPC (en fonction de C)

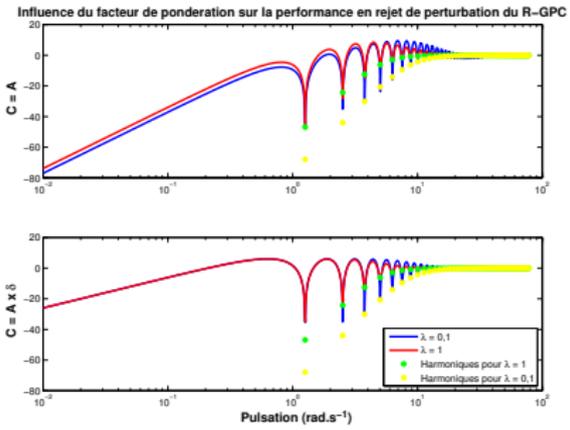


PRC (en fonction de C)

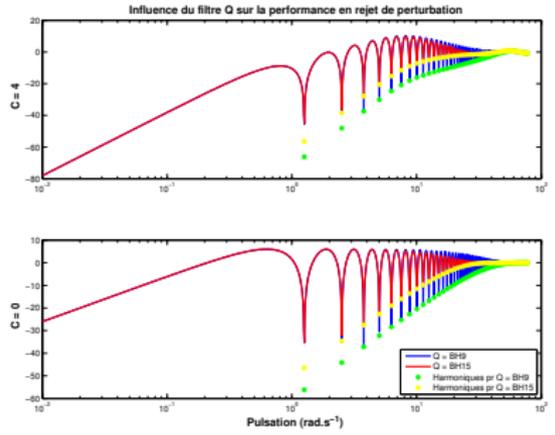


Performance en rejet de perturbations de sortie (2) : $\bar{\sigma}(\mathbf{T}_{yd})$

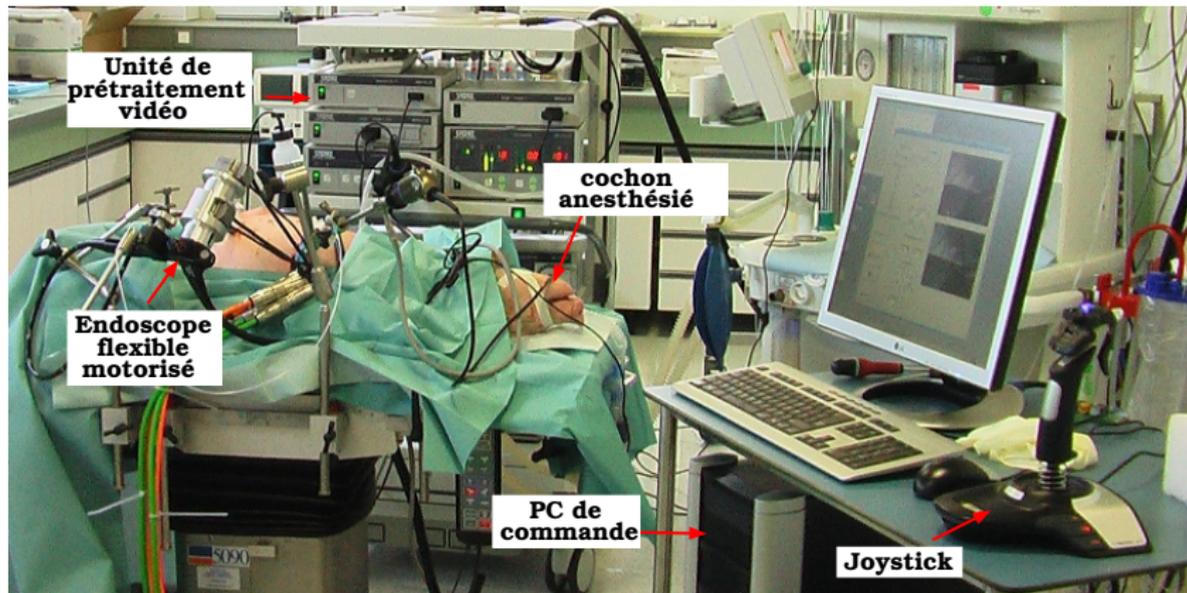
RGPC (en fonction de λ)



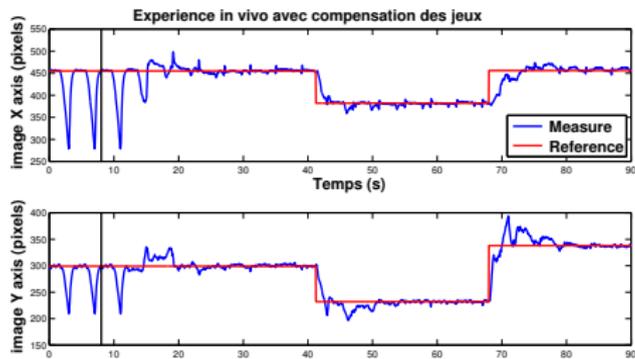
PRC (en fonction de $Q(z, z^{-1})$)



Dispositif expérimental



Expérimentations *in vivo*



Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Commande pour le rejet de perturbations périodiques
- 3 Adaptation aux changements de profondeur**
 - Modélisation détaillée de la boucle d'asservissement visuel
 - Découplage par estimation en ligne du modèle
 - Mise à jour du vecteur de commandes passées
 - Estimation du rapport de profondeur
 - Expérimentations
- 4 Rejet de perturbations non périodiques
- 5 Conclusions

Introduction

Objectifs

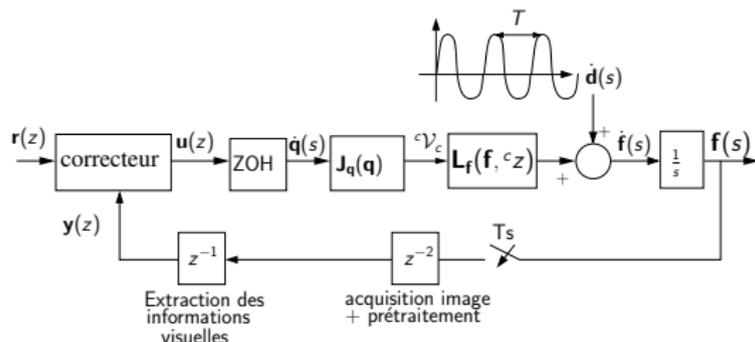
- Permettre à l'utilisateur de se rapprocher de la cible en déplaçant manuellement l'endoscope
- Préserver les performances en rejet du mouvement respiratoire et en suivi de consigne

Problème

- Les gains du modèle dépendent fortement de la profondeur de la cible
⇒ garantir la stabilité



Asservissement visuel 2D : modélisation détaillée



Modélisation

$$P(z^{-1}) = \frac{y(z)}{u(z)} = J \frac{T_s z^{-4}}{1-z^{-1}}$$

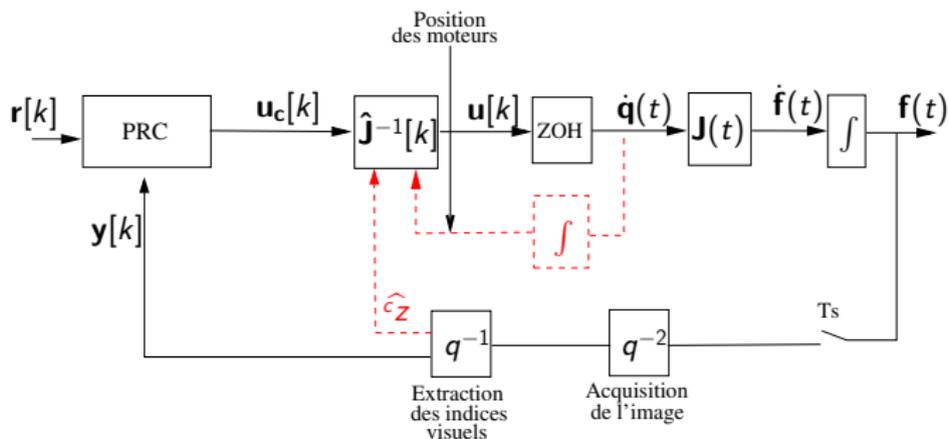
avec $J = L_f(\mathbf{f}, c_z) J_q(\mathbf{q})$

- $L_f(\mathbf{f}, c_z)$ est la matrice d'interaction
- $J_q(\mathbf{q})$ est la matrice Jacobienne du robot

Matrice d'interaction

- Dépend de $\mathbf{f} = [X \ Y]^T$ projection du point
- $\mathbf{M} = [c_x \ c_y \ c_z]^T$ et de la profondeur c_z
- La profondeur c_z est inconnue

Découplage par estimation en ligne du modèle



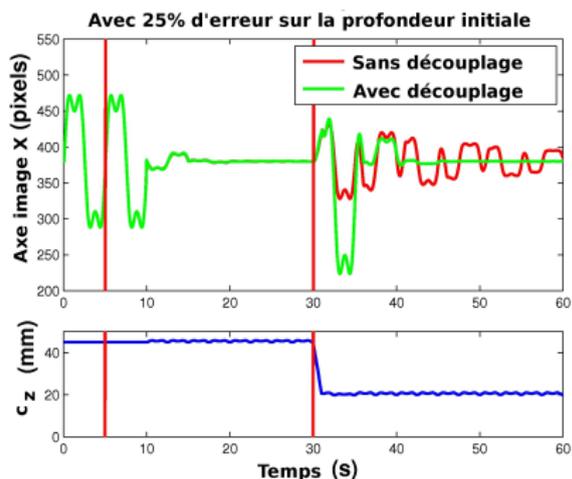
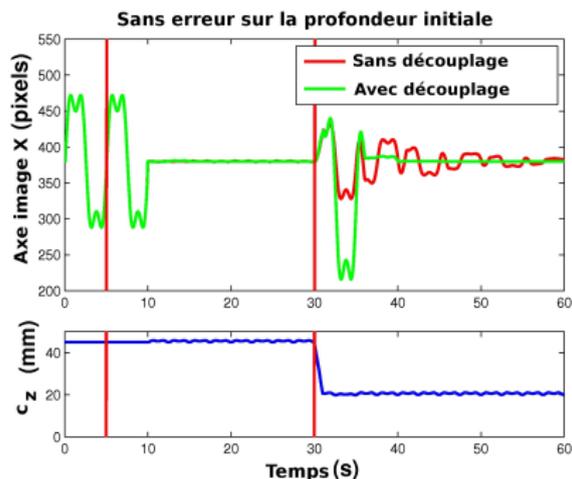
Fonction de transfert en BO modifiée $\mathbf{P}_{dec}(z^{-1}) = \frac{\mathbf{y}(z)}{\mathbf{u}_c(z)} = \mathbf{J}\hat{\mathbf{J}}^{-1} \frac{T_s z^{-4}}{1-z^{-1}}$

Un découplage parfait est obtenu pour $\hat{\mathbf{J}}[k] = \mathbf{J}[k]$

- Le système à commander est indépendant de la profondeur

$$\mathbf{P}_{dec}(z^{-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{T_s z^{-4}}{1-z^{-1}}$$

Simulations du découplage



Résultats

- + La stabilité peut être garantie malgré les modifications de profondeur
- + Bon comportement même en présence d'erreur sur l'estimation initiale de la profondeur
- - Mauvais transitoire lors d'un changement de profondeur

Mise à jour du vecteur de commandes

Correcteur PRC pour $Q = 1$

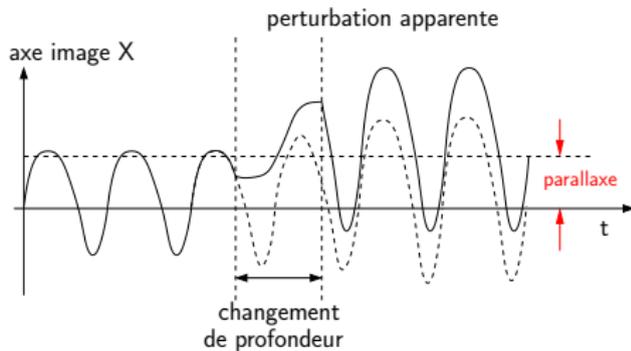
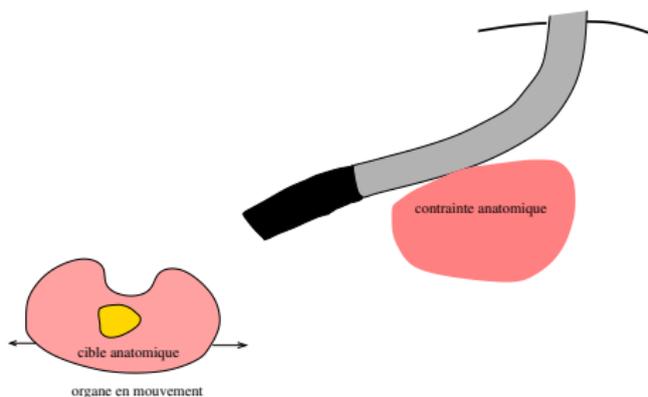
$$\mathbf{u}_c[k] = \mathbf{u}_c[k - N] + \mathbf{L}(q, q^{-1})\mathbf{e}[k - N]$$

Analyse

- Les oscillations apparaissent même lorsque l'erreur est nulle \implies liées à la réponse libre du correcteur
- La réponse libre essaye de compenser la perturbation apparente à la profondeur précédente au lieu de la perturbation apparente à la profondeur courante
- \implies Solution : corriger le vecteur de commandes passées en adéquation avec la modification de la perturbation apparente

Effet du déplacement de l'endoscope sur la perturbation apparente

Translation de l'endoscope \implies variation de profondeur

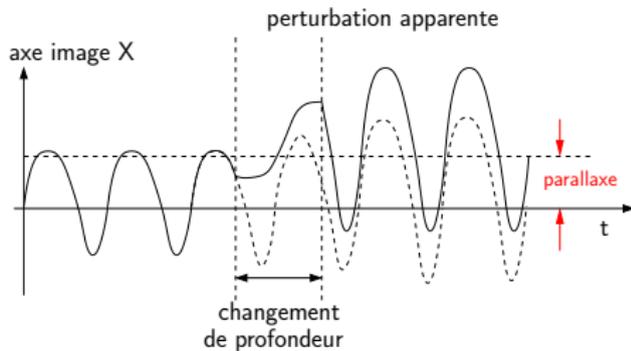
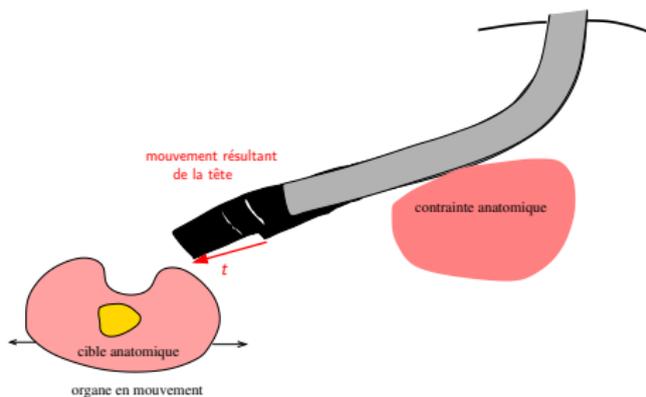


Effet sur la perturbation apparente

- Modification de la vitesse de la cible dans l'image \implies oscillations transitoires
- Apparition d'un offset causé par le parallaxe

Effet du déplacement de l'endoscope sur la perturbation apparente

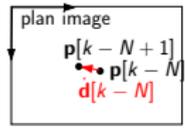
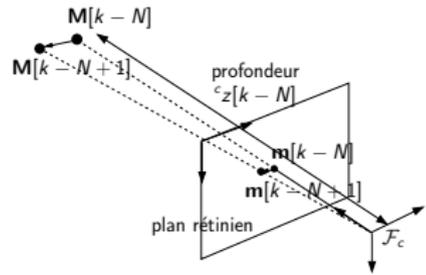
Translation de l'endoscope \implies variation de profondeur



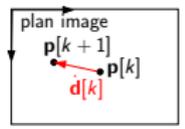
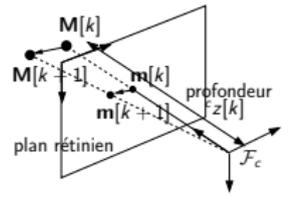
Effet sur la perturbation apparente

- Modification de la vitesse de la cible dans l'image \implies oscillations transitoires
- Apparition d'un offset causé par le parallaxe

Modification de la perturbation apparente



Avant le déplacement de l'endoscope



Après le déplacement de l'endoscope

$$\dot{\mathbf{d}}[k-N] \sim \mathbf{A} \frac{\mathbf{M}[k-N+1] - \mathbf{M}[k-N]}{T_s^c z[k-N]}$$

$$\dot{\mathbf{d}}[k] \sim \mathbf{A} \frac{\mathbf{M}[k+1] - \mathbf{M}[k]}{T_s^c z[k]}$$

Sous l'hypothèse d'une simple translation du repère caméra

$$\mathbf{M}[k-N+1] - \mathbf{M}[k-N] = \mathbf{M}[k+1] - \mathbf{M}[k]$$

$$\dot{\mathbf{d}}[k] \sim \frac{\dot{\mathbf{d}}[k-N]^c z[k-N]}{c z[k]}$$

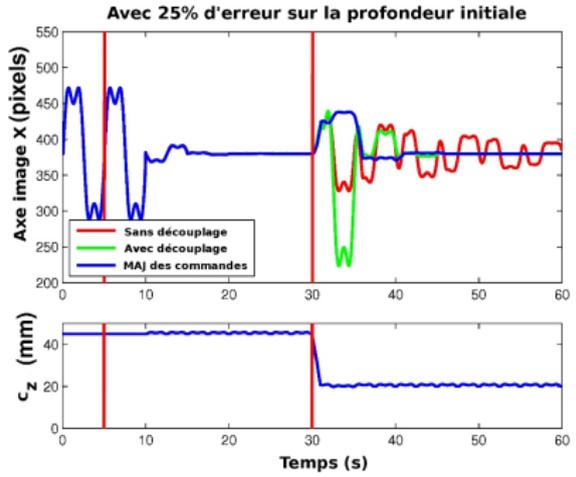
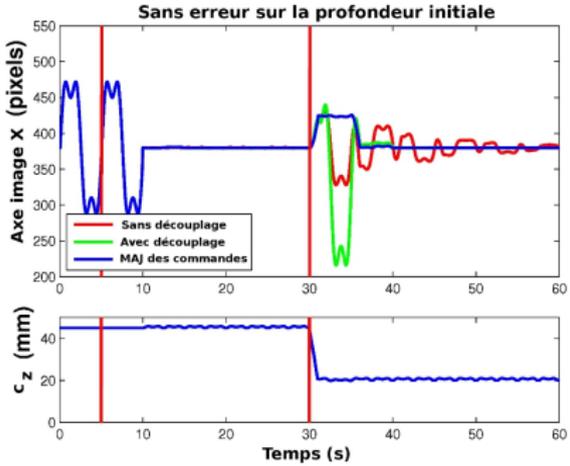
Correction du vecteur de commandes du correcteur

- Avant changement de profondeur $\dot{\mathbf{f}}[k - N] = 0$:
Si le système est bien découplé $\Rightarrow \mathbf{u}_c[k - N] = -\dot{\mathbf{d}}[k - N]$
- On souhaite avoir après changement de profondeur $\dot{\mathbf{f}}[k] = 0$:
 $\Rightarrow \mathbf{u}_c[k] = -\dot{\mathbf{d}}[k]$
- Il faut donc envoyer la commande
$$\mathbf{u}_c[k] = \frac{c_z[k-N]}{c_z[k]} \mathbf{u}_c[k - N]$$

Implémentation

- Correction de la totalité du vecteur de commande à chaque pas
 $\Rightarrow \mathbf{U}_c[k] = \mathbf{U}_c[k] \frac{c_z[k-1]}{c_z[k]}$ avec
$$\mathbf{U}_c[k] = [\mathbf{u}_c[k - 1]^T \mathbf{u}_c[k - 2]^T \dots \mathbf{u}_c[k - N]^T \dots]^T$$

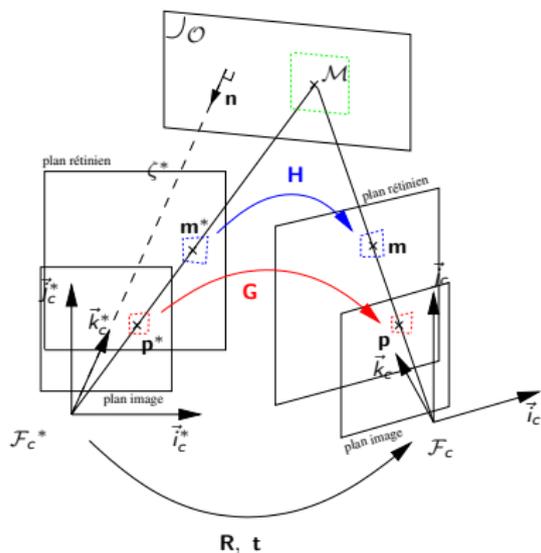
Résultats de simulation



Résultats

- Seul l'effet de parallaxe persiste

Estimation du rapport de profondeur

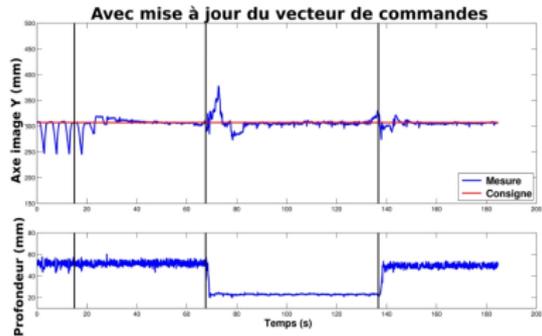
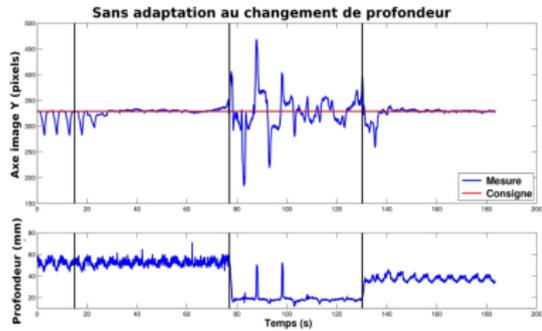


- Suivi d'une zone planaire par estimation de l'homographie

Calcul du rapport de profondeur

- A chaque pas k , l'homographie image G est estimée
- homographie métrique $H = A^{-1}GA$
- homographie euclidienne $H_{norm} = \frac{H}{\sigma_{med}}$ et alors $M[k] = H_{norm}M^*$
- ${}^c z[k]m[k] = H_{norm}{}^c z^*m^*$
 $\implies \frac{{}^c z[k]}{{}^c z^*} = \frac{m^T H_{norm} m^*}{m^T m}$
- $\frac{{}^c z[k-1]}{{}^c z[k]} = \frac{{}^c z[k-1]}{{}^c z^*} \left(\frac{{}^c z[k]}{{}^c z^*} \right)^{-1}$

Adaptation aux changements de profondeur - Expérimentations *in vivo*



Conclusion

Résultats

- La stabilité est préservée lors de changements de profondeur
- Les oscillations transitoires sont limitées par l'adaptation du vecteur de commandes
- Approche originale en asservissement visuel

- Profondeur initiale obtenue manuellement

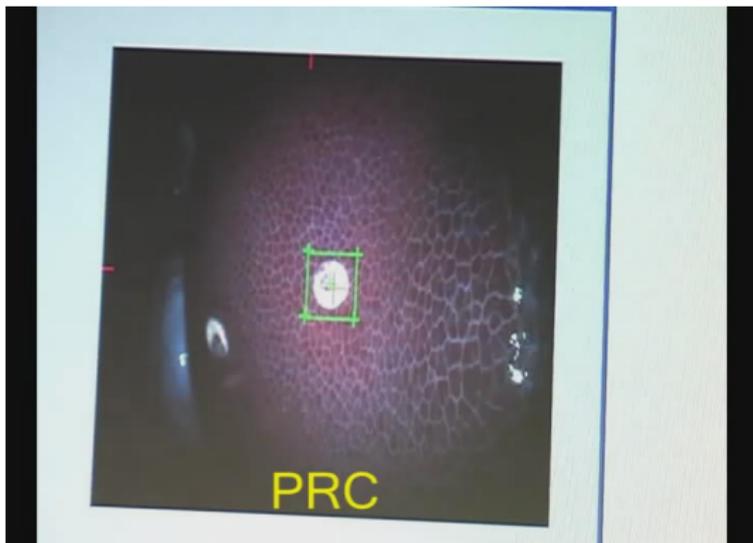
Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Commande pour le rejet de perturbations périodiques
- 3 Adaptation aux changements de profondeur
- 4 Rejet de perturbations non périodiques**
 - Suppression de la répétition
 - Expérimentations
- 5 Conclusions

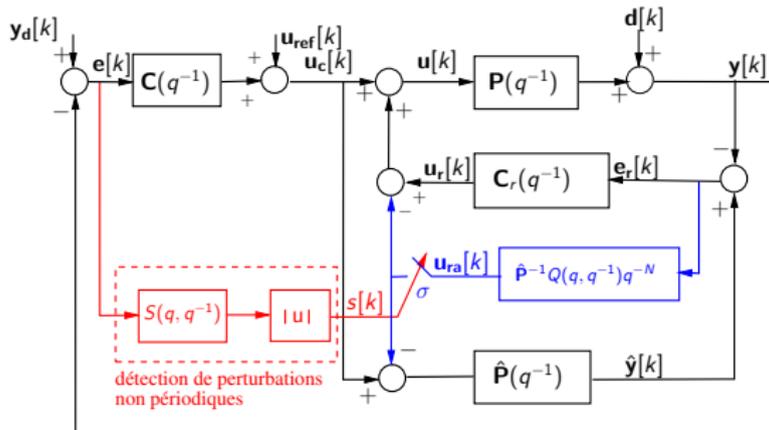
Introduction

Problématiques

- Apparition de perturbations non périodiques
 - Déplacements manuels de l'endoscope
 - Interaction des outils avec l'environnement
- Les PRC et RGPC ne rejettent pas efficacement ce type de perturbation (avec une période de retard ou génère une répétition à la période suivante)



Suppression de la répétition : loi de commande à commutation



Neutraliser le rejet de la perturbation non périodique du PRC

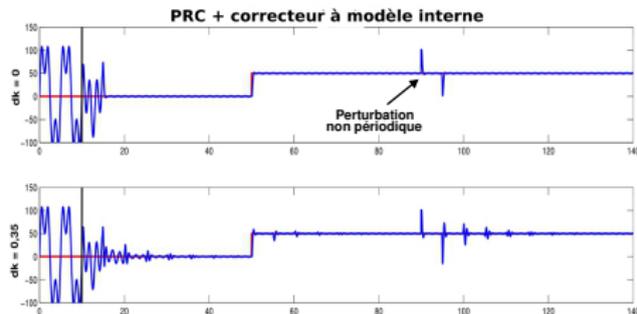
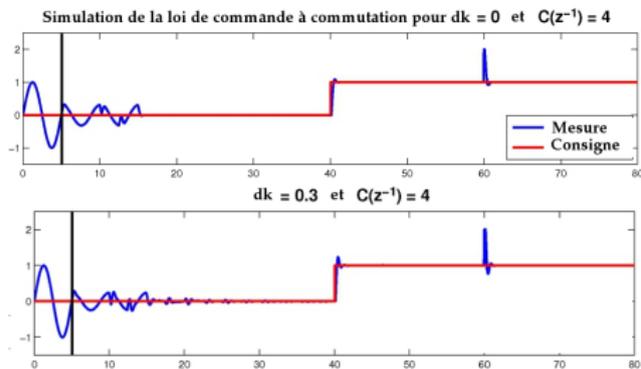
- Soustraire la contribution d'apprentissage de la sortie du PRC : $u_{ra}[k] = \hat{P}^{-1}(q^{-1})Q(q, q^{-1})q^{-N}e_r[k]$.
- Compenser virtuellement la perturbation non périodique dans le modèle pour ramener $e_r[k]$ à 0

Détection de la perturbation non périodique

- Après convergence, si $|e[k]| > \sigma \Rightarrow$ perturbation non périodique
- Si $S(q, q^{-1})q^{-N}e[k] > \sigma \Rightarrow$ perturbation non périodique à la période précédente
- Moyenne sur une fenêtre de taille N :

$$s(q, q^{-1}) = \frac{1}{N} \left(q^d + \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} (q^{-i+d} + q^{i+d}) \right)$$

Simulation de la loi de commande à commutation



- + Bon suivi de consigne
- + Bon rejet de perturbations périodiques
- + Bon rejet de perturbations non périodiques
- - Temps d'apprentissage plus long

Loi de commande à commutation : robustesse dans le cas SISO

On considère les incertitudes sur le gain $P = (1 + dk)\hat{P}$.

Représentation d'état du système incertain à commutation

Représentation d'état de la BF :

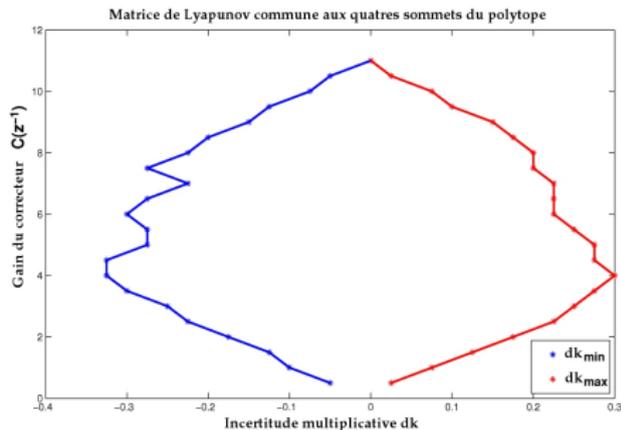
$$\mathbf{x}(k+1) = \hat{A}_{\sigma(k)}\mathbf{x}(k) + \hat{B}_{\sigma(k)}[\mathbf{r}(k) \mathbf{d}(k)]$$

$$\mathbf{y}(k) = \hat{C}_{\sigma(k)}\mathbf{x}(k) + \hat{D}_{\sigma(k)}[\mathbf{r}(k) \mathbf{d}(k)]$$

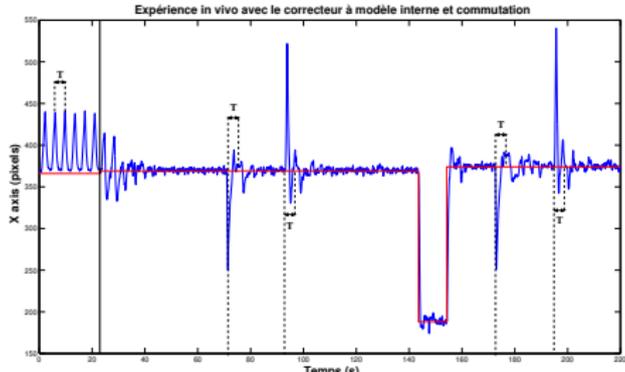
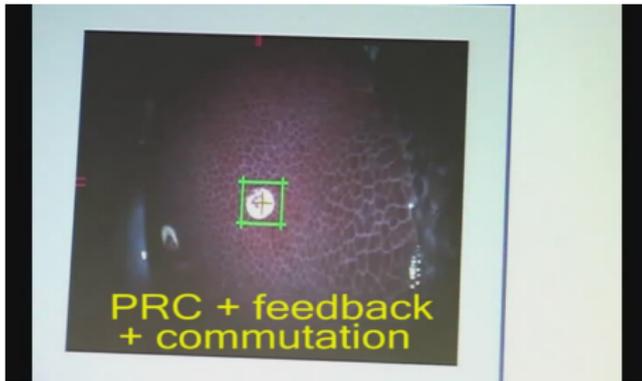
Condition suffisante de stabilité

$Q = Q^T > 0$ et

$$A_{ij}^T Q A_{ij} - Q < 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j = 1, \dots, 2^P$$



Loi de commande à commutation - Expérimentations *in vivo*



Plan de la présentation

- 1 Introduction
- 2 Commande pour le rejet de perturbations périodiques
- 3 Adaptation aux changements de profondeur
- 4 Rejet de perturbations non périodiques
- 5 Conclusions**

Conclusions générales

- Stabilisation active d'un endoscope flexible en chirurgie transluminale :
 - Compensation des mouvements physiologiques
 - Pilotage possible de la position de la cible dans l'image endoscopique stabilisée
 - Coopération entre mode autonome et manipulation du chirurgien

Réalisations

- Prototype d'endoscope motorisé
- Comparaison et implémentation des correcteurs R-GPC et PRC
- Estimation et compensation locale des jeux
- Adaptation des lois de commande aux changements de profondeur
- Loi de commande à commutation pour rejeter efficacement les perturbations non périodiques
- Validation en condition *in vivo*

Travaux en cours

- Détection de perturbations non périodiques :
 - réglage adaptatif du seuil de commutation σ
 - autres méthodes de détection
- Adaptation aux changements de profondeur :
 - méthodes d'estimation de la profondeur initiale
 - dépendance de l'estimation du rapport de profondeur à l'algorithme de suivi
- Algorithme de suivi robuste - détection de défaut

Perspectives

- Compensation des jeux
 - estimation continue des jeux
 - réétudier la conception des endoscopes flexibles
- Evaluation en condition *in vivo* par le chirurgien
- Motoriser les 2 degrés de liberté du corps de l'endoscope
 - Compensation des variations de profondeur
 - Télémanipulation
- Autres applications envisageables
 - Microscopie endoscopique confocale
 - Chirurgie à trocart unique

Merci pour votre attention