



Commande H_∞ des Robots à Câbles

Présenté par :

R. CHELLAL L. CUVILLON E. LAROCHE

ryad.chellal@unistra.fr
Laboratoire ICube
Université de Strasbourg, France

Séminaire du GT MOSAR
28 Novembre
Toulouse, France

Plan

- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats
- 6 Conclusion

- 1 Introduction
 - Context
 - Problématiques & Approche de commande
 - Résultats préliminaires de commande
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats
- 6 Conclusion

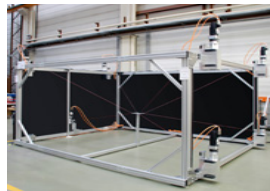
Context

Tâche robotique

- Tâche de manipulation
- Utilisant des Robots Parallèles à Câbles

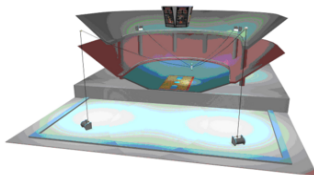
Avantages

- Larges espaces de travail
- Mouvements à très grande vitesse et précision
- Géométrie modulable



Applications

- Sauvetage
- Réhabilitation
- Chirurgie
- Architecture
- Sports



Problématiques & Approche de commande

Commande de la position

I1 **Dynamique** complexe :

- **Multi-variable**
- **Non-linéaire**
- **Couplée**

I2 **Fonctionnement** complexe

I3 **Pose de l'effecteur** imprécise estimée par :

- Les mesures des angles moteurs
(sensibles aux **déformations des câbles**)
- Modèle Cinématique Direct
(**imprécis** and **difficile à obtenir**)

Commande de la force

I4 Risque de **perte de tension**
dans les câbles

Approche de commande retenue

S1 Méthodologie **commande dynamique H_∞**

S2 Commande directement dans l'**espace opérationnel**

S3 **Mesure directe** de la pose de l'effecteur par **vision**

S4 Algorithme de **gestion des tensions**

Résultats préliminaires de commande

Approche de commande

- Commande cinématique
- Validation sur le robot INCA 6D



Résultats

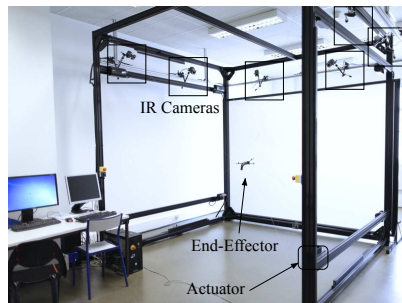
- Bonnes performances en poursuite de trajectoires :
 - Temps de réponse de 500 ms
 - Précision < 1 mm en translation
 - Précision < 1 deg en rotation
- Bonnes propriétés de rejet de perturbations
- Loi de commande :
 - Simple gain (temps calcul minimal)
 - Assure découplage Position / Orientation

- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
 - Description matérielle
 - Description logicielle
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats
- 6 Conclusion

Description matérielle : Robot INCA

INCA 6D robot

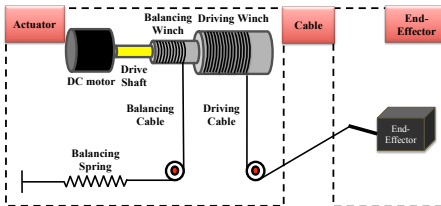
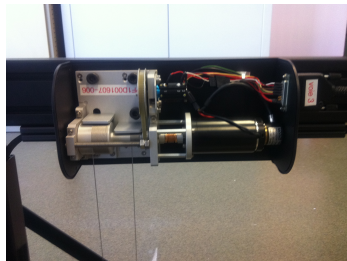
- Espace de travail cubique (largeur de 3 m)
- 8 Actionneurs (répartis sur les sommets)
- 8 Câbles moteurs (déplacer l'effecteur)
- 8 Câbles d'équilibrage (prétention des câbles)



Description matérielle : Actionneurs

Actionneurs

- DC Moteur
(Maxon 148877 avec une boucle locale de courant)
- Charges :
 - Rouleau moteur
 - Rouleau d'équilibrage



Description matérielle : Capteurs

Capteurs proprioceptifs

- 8 Codeurs optiques incrémentaux (angles moteurs)
- 8 Capteurs de courant (courants moteurs)



Capteurs extéroceptifs

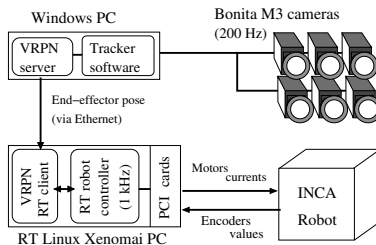
- 6 Caméras Vicon (pose de l'effecteur)



Description logicielle : Architecture de commande temps-réel

Programme temps-réel en 2 tâches sur le "PC sous RT Linux Xenomai"

- Tâche temps-réel Xenomai périodique : chaque 1 ms
 - lis les angles moteurs mesurés
 - calcul et envoi les courants moteurs de commandes
 - vérifie les sécurités
- Processus Linux standard : chaque 5 ms
 - attente de la pose de l'effecteur provenant du "PC sous Windows" à travers le réseau Ethernet UDP



- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
 - Hypothèses
 - Modélisation cinématique
 - Modélisation dynamique
 - Modèle nominal
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats
- 6 Conclusion

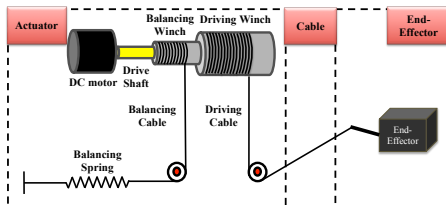
Hypothèses

Modèle considéré

- Dérive d'un modèle générique aux robots à m ddl avec n câbles
- Augmenté du système de préention spécifique à l'INCA (câbles, rouleaux et ressorts d'équilibrage)

Hypothèses

- H₁ Câbles de **masse négligeable**
(rectilignes)
- H₂ Câbles de **raideur infinie**
(inextensibles)



Modélisation cinématique

Notations

- Pose de l'effecteur

$$X_e = [P_e \quad \Phi_e]^T$$

- Positions des moteurs

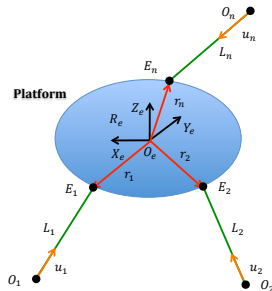
$$\theta = [\theta_1 \quad \dots \quad \theta_n]^T$$

Modèle Cinématique Inverse

- MCI par différentiation du MGI :

$$\dot{\theta} = \underbrace{J_\theta(X_e) \text{diag}(I_{3 \times 3}, J_{rpy}(\Phi_e))}_{J_g(X_e)} \dot{X}_e$$

où : $J_\theta(X_e), J_{rpy}(\Phi_e)$ identiques aux robots parallèles rigides



Modélisation dynamique

Notations

- Efforts sur l'effecteur

$$F_e = [f_e \ m_e]^T$$

- Courants moteurs

$$I_m = [I_{m1} \ \dots \ I_{mn}]^T$$

- Tensions des câbles

$$T = [T_1 \ \dots \ T_n]^T$$

Modèle Dynamique Direct

- MDD du système dans l'espace opérationnel :

$$M(X_e) \ddot{X}_e + C(X_e, \dot{X}_e) \dot{X}_e + K(X_e) X_e + G = F_{ev}$$

$$\text{sous : } T_{\min} \leq T(I_m, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \leq T_{\max}$$

- Efforts virtuels :

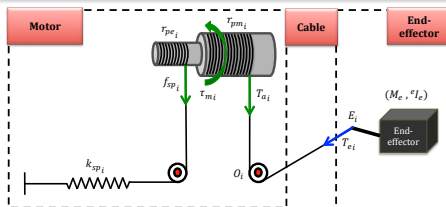
$$F_{ev} = W_I(X_e) I_m$$

$$\text{avec : } W_I(X_e) = -J_{\theta}^T(X_e) K_{em}$$

Dynamique des actionneurs

- Tensions des câbles estimées en utilisant la dynamique des actionneurs :

$$T(I_m, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = T_o + R_{pm}^{-1} [K_{em} I_m - J_{eq} \ddot{\theta} - F_{veq} \dot{\theta} - F_{seq} \text{sign}(\dot{\theta}) - K_{eq} \theta]$$



Modèle nominal : Comportement fréquentiel en boucle ouverte

Notations

- Vecteur d'état
 $x = [X_e^T \dot{X}_e^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$
- Vecteur de commande
 $u = F_{ev} \in \mathbb{R}^6$
- Vecteur de sortie
 $y = X_e \in \mathbb{R}^6$

Linéarisation du système

- MDD linéarisé autour de (x_o, u_o) :

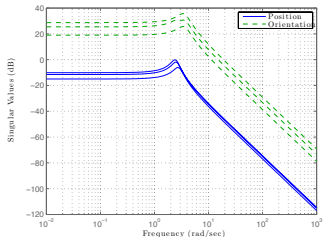
$$M_o \delta \ddot{X}_e + C_o \delta \dot{X}_e + K_o \delta X_e = \delta F_{ev}$$

- Représentation d'état d'un système LTI :

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B u \\ y = C x + D u \end{cases}$$

- Point de fonctionnement (x_o, u_o) :

- Centre de l'espace de travail, à vitesse et accélération nulles
- Paramètres cinématiques et dynamiques nominaux (**identification par erreur de sortie**)



Comportement fréquentiel

- Système LTI du 2nd ordre "sous-amorti" (pour la position et orientation)
- Pulsations de résonance :
 - 2.45 rad/s (position)
 - 3.45 rad/s (orientation)

- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddl
- 4** Commande dynamique H_∞
 - Schéma de commande
 - Commande de la position
 - Commande de la force
- 5 Résultats
- 6 Conclusion

Schéma de commande

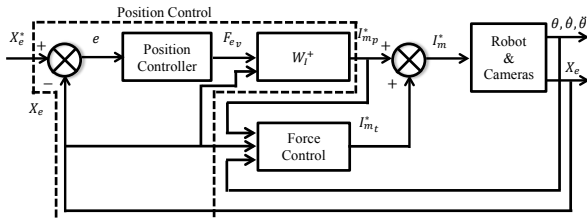
Schéma de commande en 2 parties en cascade

- Commande de la position :
 - Asservissement visuel dynamique basé position
 - Commande de la pose de l'effecteur X_e à une trajectoire de référence X_e^*

$$X_e \longrightarrow X_e^*$$

- Commande de la force :
 - Algorithme de gestion des tensions
 - Maintien des tensions des câbles T dans une région réalisable $[T_{\min} \ T_{\max}]$ sans modifier la trajectoire de l'effecteur X_e

$$T \in [T_{\min} \ T_{\max}]$$



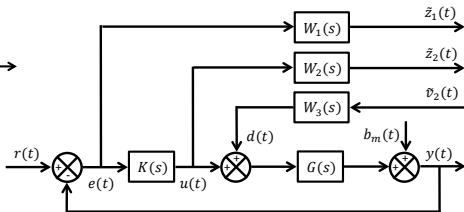
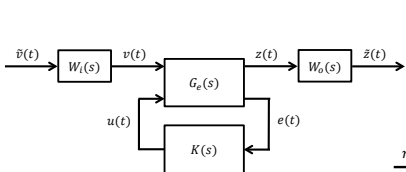
Commande de la position : Schéma de synthèse H_∞ standard à 4 blocs

Signaux d'intérêt

- Entrées extérieures
 $v = [r^T \ d^T]^T$
- Sorties à surveiller
 $z = [e^T \ u^T]^T$

Filtres de pondération

- Pondérations d'entrée
 $W_i(s) = \text{diag}(\mathbb{I}_{6 \times 6}, W_3(s))$
- Pondérations de sortie
 $W_o(s) = \text{diag}(W_1(s), W_2(s))$



Commande de la position : Synthèse du correcteur H_∞

Performances désirées

- Filtre passe-haut " $1/W_1(s)$ " :
 - Poursuite de trajectoires
 - Rapidité : bande passante de 5.66 rad/s
 - Stabilité : marge de gain de 0.5
 - Précision : erreur statique de 10^{-3} due à d (position et orientation)
- Filtre passes-bas " $1/W_2(s)$ " :
 - Effet Roll-off par rapport au bruit de mesure
 - Robustesse par rapport aux dynamiques non modélisées
- Filtre passes-bande ou passe-haut " $1/W_1 W_3(s)$ " :
 - Rejet de perturbations

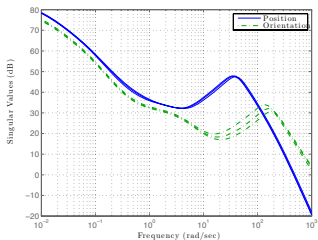
Filtres de pondération choisis

● Forme :

$$W_k(s) = w_k(s) \mathbb{I}_{6 \times 6} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} w_1(s) = \frac{0.5s + 7.5}{s + 0.0075} \\ w_2(s) = \left(\frac{0.001s + 0.00001}{0.0001s + 1} \right)^2 \\ w_3(s) = 0.15 \frac{s + 10}{s + 0.1} \left(\frac{2.333s + 1}{0.2333s + 1} \right)^2 \end{cases}$$

Commande de la position : Comportement fréquentiel en boucle fermée

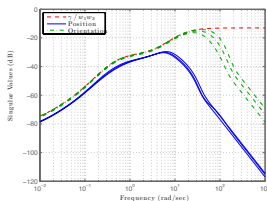
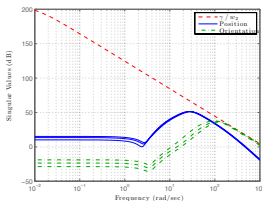
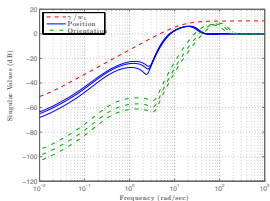
- Correcteur H_∞ : Solver "Matlab Robust Control Toolbox"



Comportement fréquentiel

- Basses fréquences : Gain élevé (rejet de perturbations)
- Hautes fréquences : Gain atténué (effet Roll-off par rapport au bruit de mesure)

- Transferts d'intérêt :



- (a) Transfert $T_{er}(s) = S(s)$ et (b) Transfert $T_{ur}(s) = SG(s)$ et (c) Transfert $T_{ed}(s) = KS(s)$ et son Gabarit $\gamma/w_1(s)$

Commande de la force : Conversion commande Virtuelle vers Réalisable

Conversion commande "Virtuelle" vers "Réalisable"

- Convertir : efforts virtuels F_{ev} de commande en courants moteurs I_m
- Résoudre :

$$F_{ev} = W_I(X_e) I_m$$

sous :
$$T_{\min} \leq T(I_m, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \leq T_{\max}$$

Problème d'optimisation

- Cas d'un actionnement redondant : Minimiser la fonction objectif E :

$$E = \frac{1}{2} (I_m^* - I_{obj})^T (I_m^* - I_{obj}) + (F_{ev} - W_I I_m^*)^T \lambda$$

sous :
$$T_{\min} \leq T(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \leq T_{\max}$$

Solution sans contraintes

- Ensemble des solutions :

$$I_m^* = \underbrace{W_I^+(X_e) F_{ev}}_{I_{m_p}^* \equiv \text{position}} + \underbrace{[I_{n \times n} - W_I^+(X_e) W_I(X_e)] I_{obj}(T_{obj}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})}_{I_{m_n}^* \in \mathcal{N}(W_I) \equiv \text{tension}}$$

- Déterminer : T_{obj} qui assure :

$$T_{\min} \leq T(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \leq T_{\max}$$

Commande de la force : Algorithmes existants

Algorithmes existants

- Calcul de T_{obj}
- Algorithmes itératifs basés sur la programmation linéaire, quadratique et non-linéaire, non adaptés à la commande en temps-réel
- Algorithmes non itératifs optimisés pour la commande en temps-réel

Algorithme proposé

- Choix de T_{obj} fixe
- Calcul de la solution réalisable I_m^* par saturation des contraintes de tensions violées
- Algorithme non itératif de Lafourcade étendu, en tenant compte :
 - Dynamique des actionneurs
 - Saturations physiques des actionneurs

Commande de la force : Algorithme proposé

Algorithme de gestion des tensions

1 Définir $T_{\text{obj}} \in [T_{\text{min}} \ T_{\text{max}}]$, et Dédire

$I_{\text{obj}}(T_{\text{obj}}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \in [I_m(T_{\text{min}}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \ I_m(T_{\text{max}}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})] \cap [I_{\text{min}} \ I_{\text{max}}]$ correspondant

2 Calculer I_m^* qui minimise E sans prise en compte des contraintes de tensions, et Dédire $T(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ correspondant :

avec :

$$I_m^* = I_{m_p}^* + I_{m_n}^*$$

$$I_{m_p}^* = W_I^+ (X_e) F_{ev} \quad I_{m_n}^* = [I_n - W_I^+ W_I] I_{\text{obj}}$$

3 Calculer p le nombre de contraintes de tensions violées $T_{\text{min}} \not\leq T_i(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \not\leq T_{\text{max}}$

4 si $p = 0$ alors I_m^* est une solution réalisable sinon

5 pour $q = 1 : \min(p, n - m)$

5.1 Sélectionner une combinaison de q tensions parmi les p tensions violées, à saturer via la matrice de sélection $S = [s_1 \ \dots \ s_q] \in \mathbb{R}^{n \times q}$

5.2 Calculer $T_{\text{sat}} = S^T T$, et Dédire $I_{\text{sat}}(T_{\text{sat}}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ correspondant

5.3 Calculer I_m^* qui minimise $E_{\text{sat}} = E + (S^T I_m^* - I_{\text{sat}})^T \mu$ en considérant les contraintes de tensions saturées, et Dédire $T(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$:

avec :

$$I_m^* = I_{m_p}^* + I_{m_t}^*$$

$$I_{m_t}^* = I_{m_n}^* + [W_I^+ W_I^{\text{sat}} - S] [S^T W_I^+ W_I^{\text{sat}} - I_q]^{-1} \Delta_{\text{sat}}$$

$$W_I^{\text{sat}} = W_I S \quad \Delta_{\text{sat}} = I_{\text{sat}} - S^T (I_{m_p}^* + I_{m_n}^*)$$

5.4 Calculer p_{sat} le nombre de contraintes de tensions violées $T_{\text{min}} \not\leq T_i(I_m^*, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \not\leq T_{\text{max}}$

5.5 si $p_{\text{sat}} = 0$ alors I_m^* est une solution réalisable

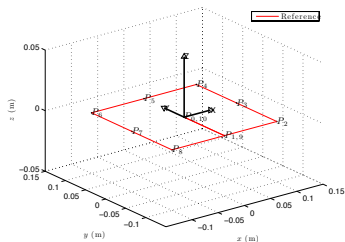
6 end pour

- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats**
 - Tâches d'évaluation
 - Performances obtenues
- 6 Conclusion

Tâches d'évaluation

Trajectoire de référence

- Carré de sommets $P_o \rightarrow P_{10}$
- Centré dans l'espace de travail O_o
- Appartenant au plan $z = 0$ m
- Largeur **0.2 m**
- Temps entre 2 sommets voisins de **4 s**
- Sans orientation $\Phi_e^* = [0 \ 0 \ 0]^T$ rad



Région de tensions réalisable

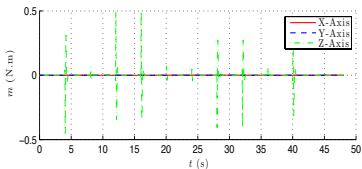
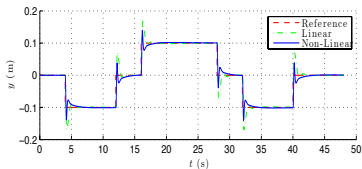
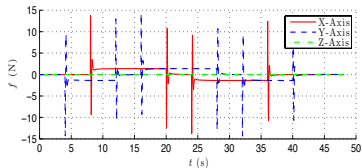
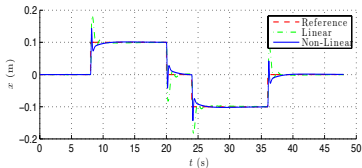
- Bornes de courants : $I_{\min} = 0$ A - $I_{\max} = 3$ A
- Bornes de tensions : $T_{\min} = 1.48$ N - $T_{\max} = 18.52$ N
- Tension objectif : $T_{\text{obj}} = 10$ N

Résultats présentés

- Résultats de simulation
- Utilisant un modèle du robot INCA 6D

Performances obtenues : Commande de la position

- Trajectoires pour la commande H_∞ de la position :

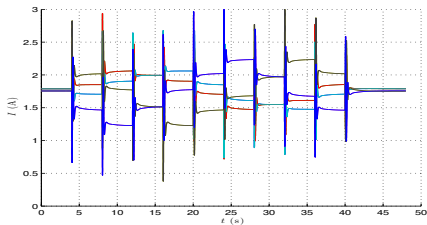


(a) Pose de l'effecteur (Signal de mesure)

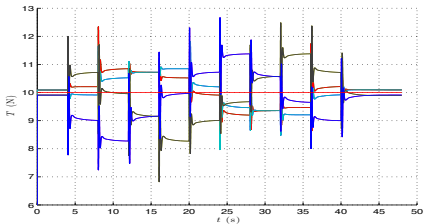
(b) Efforts sur l'effecteur (Signal de commande)

Performances obtenues : Commande de la force

- Trajectoires pour la commande de la force :



(c) Courants moteurs



(d) Tensions des câbles

- 1 Introduction
- 2 Description du robot INCA
- 3 Modélisation des robots à câbles à 6 ddls
- 4 Commande dynamique H_∞
- 5 Résultats
- 6 Conclusion**

Conclusion

Conclusion

- Correcteur H_∞ de position combiné avec l'algorithme de gestion des tensions permettent d'attendre de bonnes performances en poursuites de trajectoires et de rejet de perturbation (effets non-linéaires du système), tout en maintenant les câbles sous des tensions réalisables
- Performances du correcteur efficaces pour une évolution dans un domaine de largeur raisonnable (carré de largeur 1 m)

Perspectives

- Valider le schéma de commande expérimentalement (actuellement instable)
 - Nouveau réglage imposant des contraintes de rejet de perturbations en relâchant les contraintes de poursuite de trajectoires
 - Identification d'un modèle mathématique linéaire
- Analyse de la robustesse pour une validation sur un espace plus large
- Stratégie de gain adaptatif pour adapter l'évolution du correcteur H_∞ (LTI) de position par rapport à la position

Merci de Votre Attention !

Avez-vous des Questions ?