



Étalonnage des robots à câbles

Identification et qualification

Julien Alexandre dit Sandretto
Thèse dirigée par David Daney et Gilles Trombettoni

Contexte

- ▶ Un projet National : CoGiRo (Control of Giant Robots)
- ▶ Une problématique intéressante : construction d'un robot à câbles de grande dimension (15m×11m×6m)
- ▶ Un objectif ambitieux : commander ce robot pour une tâche de palettisation

Financement

Agence National de la recherche

Membres

- ▶ Trois laboratoires : LIRMM (Montpellier), Lasmea (Clermont-Ferrand), Inria (Sophia-Antipolis)
- ▶ Une fondation : Tecnalía (Montpellier)



Problématique du projet

Une tâche de palettisation

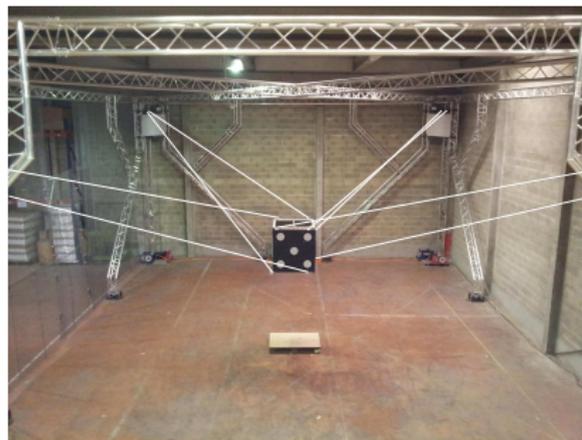
Manipulation, rangement, présence possible d'opérateurs humains
⇒ précision absolue inférieure à 5cm (0.3%)

Sujets de recherche

Construction d'un robot à câbles de grande dimension
suffisamment précis :

- ▶ Conception optimisée (LIRMM)
- ▶ Construction de qualité industrielle (Tecnalia)
- ▶ Commande référencée vision (Lasmea)
- ▶ Étalonnage du robot (Inria)

Le robot CoGiRo



CoGiRo : manipulateur à 8 câbles et 6 degrés de liberté (ddl)

Objectifs des travaux de ma thèse

Objectifs

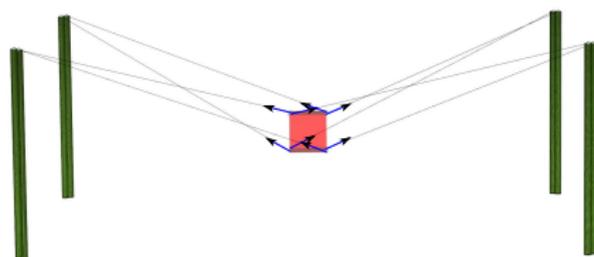
- ▶ Étalonner un robot à câble existant
- ▶ Garantir une précision suffisante pour sa tâche

Contexte difficile

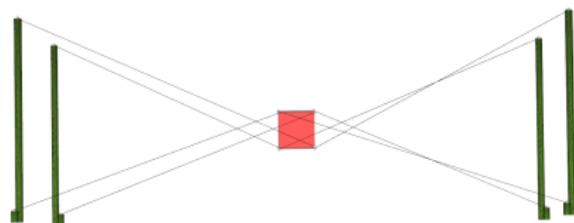
Manipulateur de grande dimension, précision exigée importante, modélisation des câbles complexe, comportement des robots à câbles non maîtrisé, lourdes charges (500kg), etc...

Robots parallèles à câbles

Espace de travail, dynamique, coût, modèles [Landsberger, 1985]



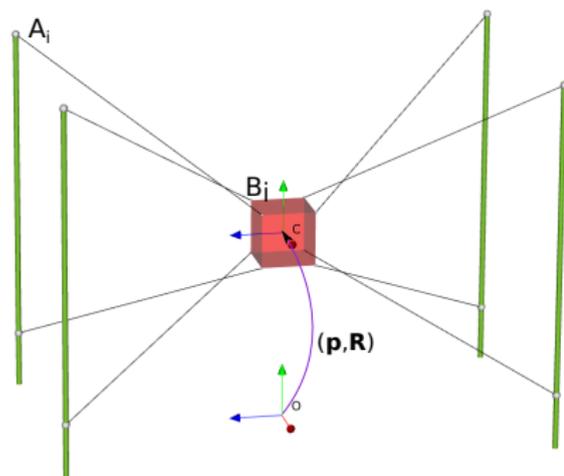
Configuration suspendue (8 câbles, 6 ddl)



Configuration pleinement contrainte (8 câbles, 6 ddl)

Robots parallèles à câbles : la géométrie

$$\| \mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \| - d_i = 0, \quad i = [1 \dots m]$$



- ▶ Plate-forme mobile liée au bâti par m câbles
- ▶ i^{eme} câble relie $A_i(a_i)$ à $B_i(b_i)$
- ▶ Pose $\mathbf{p} = [x, y, z]$ et $\mathbf{R}_{3 \times 3}$
- ▶ $d_i = \text{distance}(A_i B_i)$

Robots parallèles à câbles : géométrico-statique

Géométrie : $\| \mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \| - d_i = 0, \quad i = [1 \dots m]$

+

Équilibre statique : $\tau = J^T \mathbf{f}_e$

- ▶ Tensions τ
- ▶ Forces extérieures \mathbf{f}_e
- ▶ Jacobienne cinématique J (fonction de la pose)

Nécessite la connaissance des câbles en tension

4 câbles rigides [Carricato, 2012], sinon ouvert [Merlet, 2012]

Par la mesure : trop bruitées \Rightarrow uniquement la géométrie !

Robots parallèles à câbles : géométrico-statique

Géométrie : $\| \mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \| - d_i = 0, \quad i = [1 \dots m]$

+

Équilibre statique : $\tau = J^T \mathbf{f}_e$

- ▶ Tensions τ
- ▶ Forces extérieures \mathbf{f}_e
- ▶ Jacobienne cinématique J (fonction de la pose)

Nécessite la connaissance des câbles en tension

4 câbles rigides [Carricato, 2012], sinon ouvert [Merlet, 2012]

Par la mesure : trop bruitées \Rightarrow uniquement la géométrie !

Étalonnage

Besoin de modèles

Commande, étude, représentation du comportement

Modèles incertains

- ▶ Paramètres (estimation ou mesure), capteurs (mesure)
- ▶ Modèles (approximation)

But de l'étalonnage : amélioration du comportement

Meilleure approximation des paramètres du modèle [Wang, 1993]

Étalonnage

Besoin de modèles

Commande, étude, représentation du comportement

Modèles incertains

- ▶ Paramètres (estimation ou mesure), capteurs (mesure)
- ▶ Modèles (approximation)

But de l'étalonnage : amélioration du comportement

Meilleure approximation des paramètres du modèle [Wang, 1993]

Étalonnage

Besoin de modèles

Commande, étude, représentation du comportement

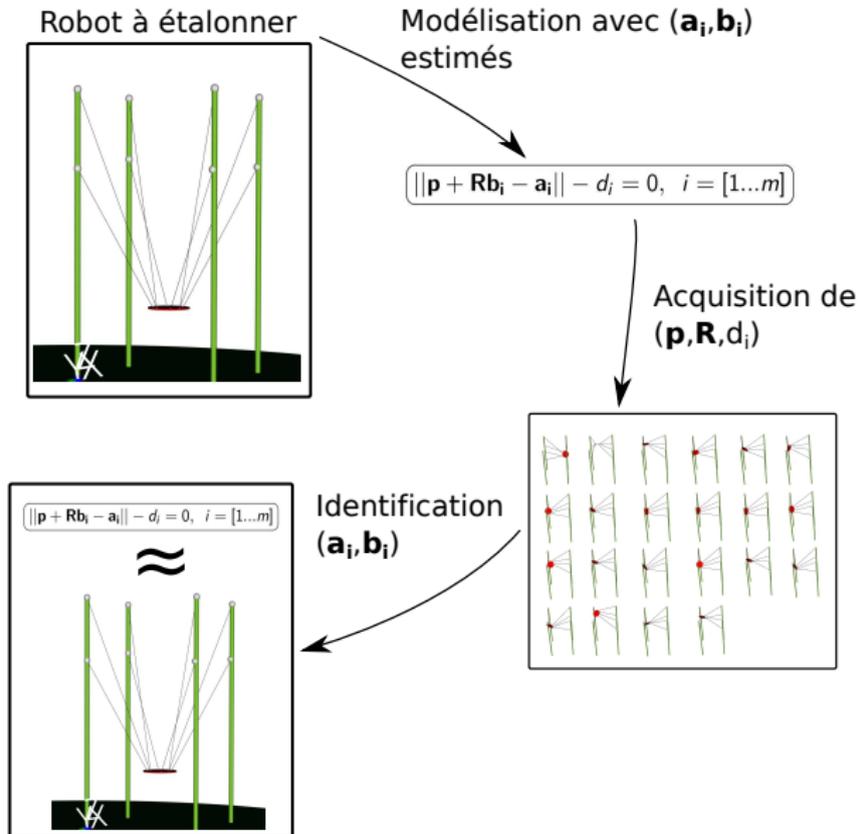
Modèles incertains

- ▶ Paramètres (estimation ou mesure), capteurs (mesure)
- ▶ Modèles (approximation)

But de l'étalonnage : amélioration du comportement

Meilleure approximation des paramètres du modèle [Wang, 1993]

Étalonnage géométrique : processus



Étalonnage géométrique : identification

$$f_k(M_k, V) = 0, \quad k = [1..N_C]$$

- ▶ M_k les mesures
- ▶ $V = [\xi, \Upsilon]$ les variables du modèle
 - ▶ ξ les paramètres à identifier
 - ▶ $\Upsilon = [\hat{\Upsilon}, \check{\Upsilon}_{1..N_C}]$
 - ▶ constantes $\hat{\Upsilon}$
 - ▶ dépendantes de la pose $\check{\Upsilon}_{k=1..N_C}$

ϵ_k : mesures incertaines, modèle approximé, paramètres estimés

À minimiser par l'identification des paramètres !

Étalonnage géométrique : identification

$$f_k(M_k, V) = 0 + \epsilon_k, \quad k = [1 \dots N_C]$$

- ▶ M_k les mesures
- ▶ $V = [\xi, \Upsilon]$ les variables du modèle
 - ▶ ξ les paramètres à identifier
 - ▶ $\Upsilon = [\hat{\Upsilon}, \check{\Upsilon}_{1..N_C}]$
 - ▶ constantes $\hat{\Upsilon}$
 - ▶ dépendantes de la pose $\check{\Upsilon}_{k=1..N_C}$

ϵ_k : mesures incertaines, modèle approximé, paramètres estimés

À minimiser par l'identification des paramètres !

Étalonnage géométrique : identification

$$f_k(M_k, V) = 0 + \epsilon_k, \quad k = [1 \dots N_C]$$

- ▶ M_k les mesures
- ▶ $V = [\xi, \Upsilon]$ les variables du modèle
 - ▶ ξ les paramètres à identifier
 - ▶ $\Upsilon = [\hat{\Upsilon}, \check{\Upsilon}_{1..N_C}]$
 - ▶ constantes $\hat{\Upsilon}$
 - ▶ dépendantes de la pose $\check{\Upsilon}_{k=1..N_C}$

ϵ_k : mesures incertaines, modèle approximé, paramètres estimés

À minimiser par l'identification des paramètres !

Méthodes d'identification

Système d'équations sur-contraint donné par les N_C mesures :

$$F = [f_1(M_1, V), \dots, f_{N_C}(M_{N_C}, V)]^T$$

avec $f_{k,i}(M_k, V) = \|\mathbf{p}_k + \mathbf{R}_k \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\| - l_{i,k}, i = [1 \dots m]$

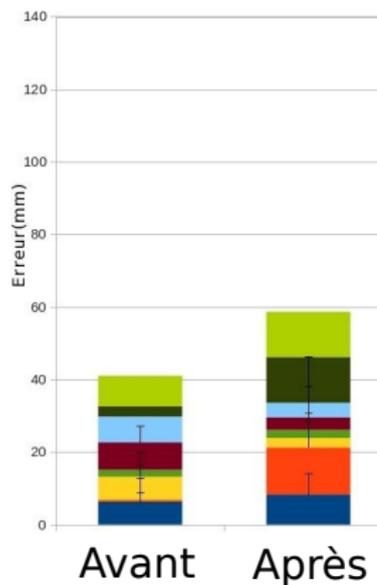
Caractérisations classiques

- ▶ Solution aux moindres carrés \hat{V} minimise le critère $F^T F$

Méthodes classiques (Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt)

- ▶ Linéarisation du système avec Taylor à l'ordre 1
- ▶ Résolution du système linéarisé sur-contraint

Étalonnage avec une approche classique



Mauvais résultats

- ▶ Mélange d'unités, de grandeurs
- ▶ Mauvais conditionnement
- ▶ Approximation modèle ($l_i = d_i$)



Divergence des paramètres



Détérioration du comportement

Validation : poses mesurées

⇒ $|l_i \text{ calculées} - l_i \text{ mesurées}|$

Méthodes d'identification : une alternative ?

Un besoin

Prise en compte des incertitudes en jeu

Une solution

Analyse par intervalle :

- ▶ Sans *a priori* sur leur distribution
- ▶ Calcul certifié
- ▶ Outils et méthodes
- ▶ Identification de paramètres [Jaulin, 2001, Daney, 2006]

Situation du sujet

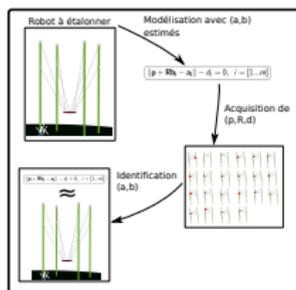
Contexte : Robot CoGiRo



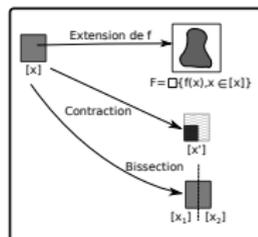
Modèle incertain (paramètres, approximation, mesures)

$$\| \mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \| - d_i = 0, \quad i = [1 \dots m]$$

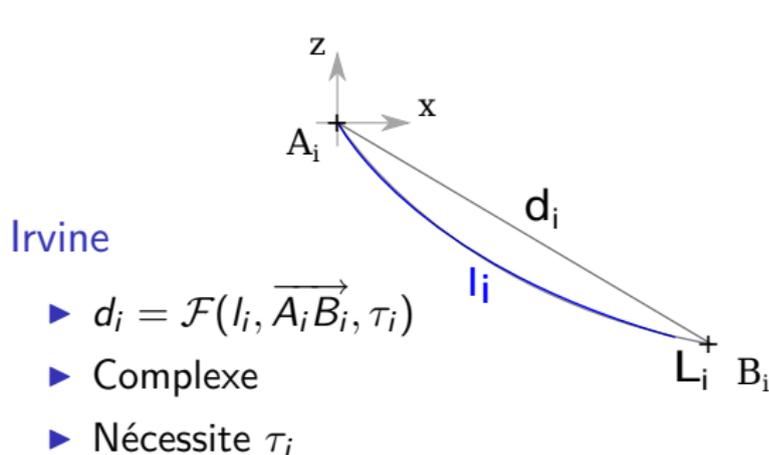
Problématique : Étalonnage



Outil : intervalles

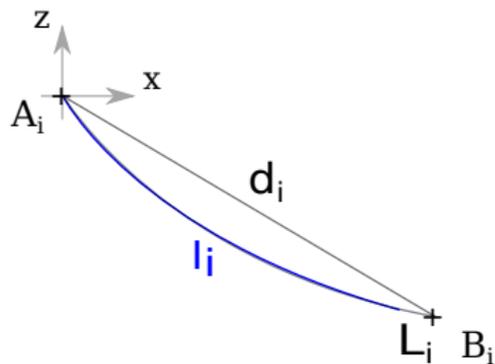


Modèle de câble

**Simplifié**

- ▶ $l_i = L_i = d_i$
- ▶ Souvent utilisé
- ▶ Peu réaliste

Incertitude de modélisation



Modèle géométrico-statique

$$\begin{cases} \|\mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\| - d_i = 0, & i = [1\dots m] \\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_e \\ d_i = \mathcal{F}(l_i, \overrightarrow{A_i B_i}, \tau_i) \end{cases}$$

Câble dans le plan vertical

(l_i déroulée, L_i réelle)

Besoin des tensions [Miermeister, 2012]

Résolution statique non maîtrisée & mesures tensions inexploitable

⇒ Utilisation du modèle simplifié ⇒ Incertitude de modélisation !

Incertitude du modèle de câble

Pour l'étalonnage :

Utilisation du modèle simplifié \neq modèle pesant élastique

Nous proposons deux approches innovantes :

1. Calculer un espace de travail où modèle simplifié acceptable
2. Considérer l'erreur induite par simplification

Sous espace de travail où l'incertitude est négligeable

Condition

- ▶ Erreur réalisée entre longueur déroulée l_i réaliste et d_i :

$$\sigma_i = |l_i - d_i|$$
- ▶ Seuil : ϵ (incertitude d'actionnement par exemple)
- ▶ Condition pour une pose : $\sigma_i \leq \epsilon, \forall i = 1..m$

Sous espace de travail

- ▶ \mathcal{SW}_X **un** sous espace de travail où l'erreur est négligeable :

$$\forall X \in \mathcal{SW}_X \Rightarrow \sigma_i \leq \epsilon, \forall i \in [1..m]$$

- ▶ Avec intervalles, inconsistance du complément :

$$[x] \subset \mathcal{SW}_X \text{ si } S_{|[x]} = \{x \in [x], \exists i \in [1..m] : \sigma_i > \epsilon\} = \emptyset$$

Sous espace de travail où l'incertitude est négligeable

Vérifier $S_{l[x]} = \emptyset$

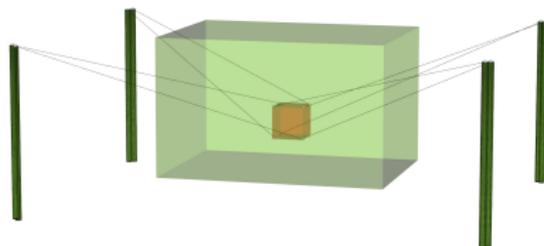
$$\left\{ \begin{array}{l} mgB_x - eT_b^x + T_b^x \ln((h-c)(c-d+j)) = 0 \\ mgB_z - T_b^x h - T_b^z e + \frac{ke^2}{2} + T_a = 0 \\ T_a - T_b^x j = 0 \\ cT_b^x - T_b^z = 0 \\ h - \sqrt{(c^2) + 1} = 0 \\ j - \sqrt{((c-d)^2) + 1} = 0 \\ dT_b^x - mgl = 0 \\ ek - mgl = 0 \\ |l - \sqrt{B_x^2 + B_z^2}| > \epsilon \end{array} \right.$$

Avec Branch & Contract
pour :

- ▶ Espace de travail
- ▶ Tous les câbles
- ▶ Plage de tension T_a
(0 à 5000 N)
- ▶ Plage de paramètres
fonction des incertitudes
(m, k)

Sous espace de travail où l'incertitude est négligeable

Vérifier $S_{l[x]} = \emptyset$



Avec Branch & Contract
pour :

- ▶ Espace de travail
- ▶ Tous les câbles
- ▶ Plage de tension T_a
(0 à 5000 N)
- ▶ Plage de paramètres
fonction des incertitudes
(m, k)

Étalonnage classique

Incertitude de modèle négligeable

Dans un sous espace de travail où modèle simplifié acceptable

Reste difficile

- ▶ Architecture théoriquement peu sensible aux erreurs sur les paramètres
- ▶ Sous espace de travail + architecture faible variation \Rightarrow \(\searrow\) identifiabilité \Rightarrow mauvais conditionnement numérique

Tous les moyens sont utilisés

- ▶ Configurations de mesure sélectionnées pour lutter contre mauvais conditionnement
- ▶ Mesures avec laser performant ($<1\text{mm}$)

Étalonnage classique

Incertitude de modèle négligeable

Dans un sous espace de travail où modèle simplifié acceptable

Reste difficile

- ▶ Architecture théoriquement peu sensible aux erreurs sur les paramètres
- ▶ Sous espace de travail + architecture faible variation \Rightarrow \searrow identifiabilité \Rightarrow mauvais conditionnement numérique

Tous les moyens sont utilisés

- ▶ Configurations de mesure sélectionnées pour lutter contre mauvais conditionnement
- ▶ Mesures avec laser performant ($<1\text{mm}$)

Étalonnage classique

Incertitude de modèle négligeable

Dans un sous espace de travail où modèle simplifié acceptable

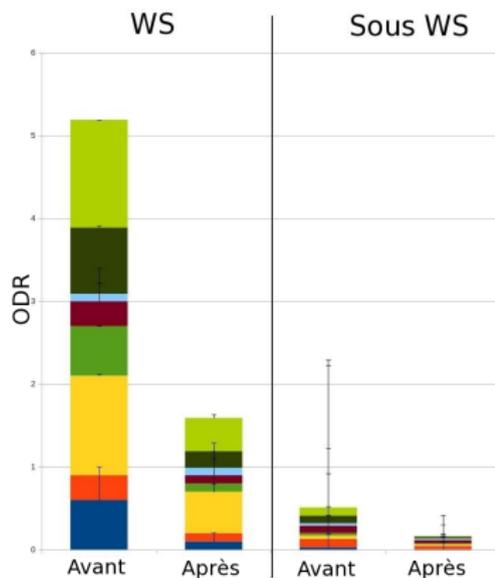
Reste difficile

- ▶ Architecture théoriquement peu sensible aux erreurs sur les paramètres
- ▶ Sous espace de travail + architecture faible variation \Rightarrow \searrow identifiabilité
 \Rightarrow mauvais conditionnement numérique

Tous les moyens sont utilisés

- ▶ Configurations de mesure sélectionnées pour lutter contre mauvais conditionnement
- ▶ Mesures avec laser performant ($<1\text{mm}$)

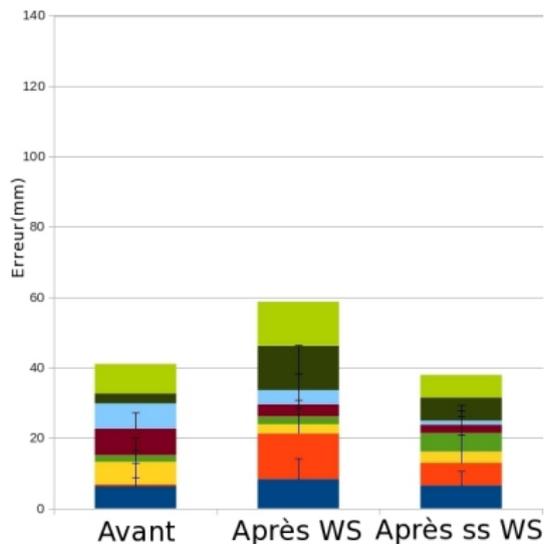
Résultats sur les poses d'étalonnage



Critère ODR avant/après étalonnage (sans unité), Levenberg-Marquardt

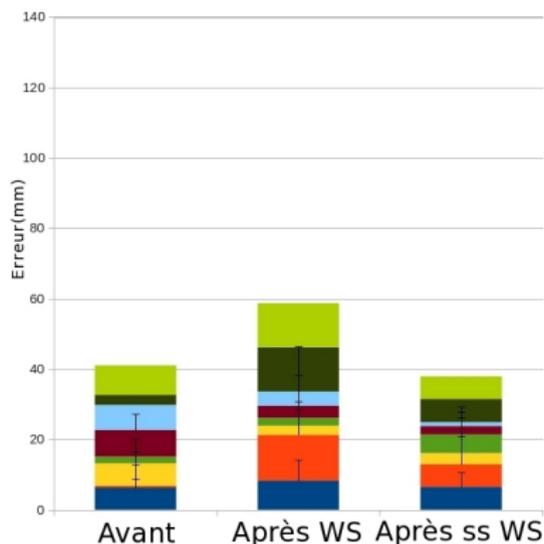
Validation sur la tâche de palettisation

Moyenne de l'erreur du *MGI* en mm sur les 13 poses :



Validation sur la tâche de palettisation

Moyenne de l'erreur du *MGI* en mm sur les 13 poses :



⇒ Besoin de prendre en compte les incertitudes !

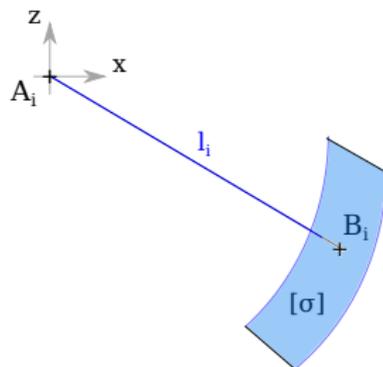
Définir un modèle de câble épais

Modèle géométrique épais

réaliste \in (simplifié + incertitude)

$$d_i \in l_i - [\sigma]$$

$$0 \in \|\mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\| - (l_i - [\sigma]), \quad i = [1..m]$$



Optimisation globale sous contrainte “Irvine”

- ▶ Erreur maximale σ_{max} (positive : câble pendant)
- ▶ Erreur minimale σ_{min} (négative : câble étiré)
- ▶ $[\sigma] = [\sigma_{min}, \sigma_{max}] \Rightarrow l_i - d_i \in [\sigma], \quad \forall i = [1..m], \forall X \in \mathcal{W}_X$

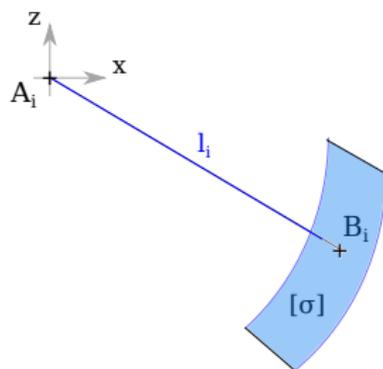
Définir un modèle de câble épais

Modèle géométrique épais

réaliste \in (simplifié + incertitude)

$$d_i \in l_i - [\sigma]$$

$$0 \in \|\mathbf{p} + \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\| - (l_i - [\sigma]), \quad i = [1..m]$$



Optimisation globale sous contrainte "Irvine"

- ▶ $\sigma_{max} = 4.7\text{cm}$
- ▶ $\sigma_{min} = -28.1\text{cm}$ (5000N)
- ▶ $[\sigma] = [-28.1, 4.7]\text{cm}$

Modélisation avec intervalles

Intervalles et incertitudes

- ▶ \hat{x} : estimée ou mesure d'une grandeur
- ▶ $[\sigma_x] = [\sigma_{min}, \sigma_{max}]$: la tolérance
- ▶ x la valeur réelle : $x \in [x] = \hat{x} + [\sigma_x]$

Équations d'étalonnage avec intervalles

$$f([M_k], [\xi]) = \|[p_k] + [R_k][b_i] - [a_i]\| - ([l_{i,k}] - [\sigma])$$

Idéal : $0 \in f([M_k], [\xi])$ pour $k = [1..N_C]$

- ▶ Paramètres bien estimés
- ▶ Modèle satisfaisant
- ▶ Pas de mesure aberrante (fréquent : défaut capteur, erreur humaine) : \hat{x} mesure aberrante $\Leftrightarrow x \notin [x] = \hat{x} + [\sigma_x]$

Caractérisation directe

$$\Sigma = \{\xi \mid \forall k \in [1..N_C], \exists \hat{M}_k \in [M_k], f(\hat{M}_k, \xi) = 0\}$$

Méthodes pour obtenir $\square\Sigma$

- ▶ Programmation par contraintes
- ▶ Schéma de Newton sur-contraint [Daney, 2006]
- ▶ Pavage [Jaulin, 2001]

Si $\Sigma = \emptyset$

Aucune information supplémentaire !

⇒ probablement dû aux modèle, mesures ou paramètres...

Caractérisations proposées

Moindres carrés

$$\Sigma_{LS} = \{\xi \mid \forall k \in [1..N_C], \exists \hat{M}_k \in [M_k], \operatorname{argmin}_{\xi} (f^2(\hat{M}_k, \xi))\}$$

- ▶ Optimisation [Hansen, 2003]
- ▶ En linéaire [Deif, Gay, Neumaier, Bentbib, Popova...]
 - ⇒ Linéarisation

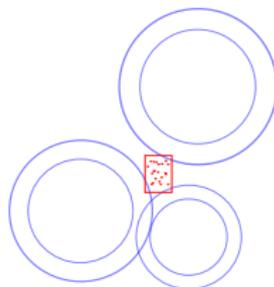
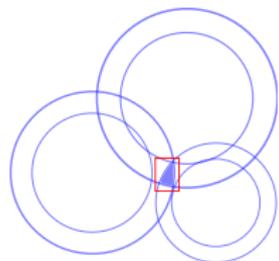
Robuste à l'inconsistance

$$\Sigma_q = \{\xi \mid \exists_q k \in [1..N_C], \exists \hat{M}_k \in [M_k], f(\hat{M}_k, \xi) = 0\}$$

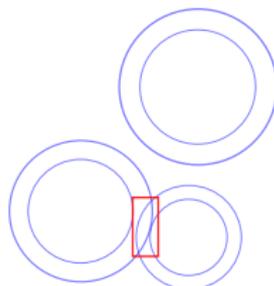
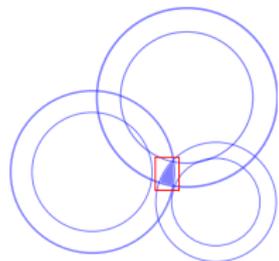
- ▶ Contraintes par contraintes et q-intersection [Jaulin, 2009]
 - ⇒ Programmation par contraintes

Caractérisations proposées

Moindres carrés



Robuste à l'inconsistance



Calculer la caractérisation aux moindres carrés

Linéarisation Taylor

$$\blacktriangleright [J_f([M], [\xi])]s = f([M], \hat{\xi})$$

Reformulation en système linéaire bien contraint

$$\blacktriangleright [A] = [J_f([M], [\xi])] \text{ et } [b] = f([M], \hat{\xi})$$

$$\blacktriangleright \text{Björck : } \begin{bmatrix} I & [A] \\ [A]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [r] \\ [s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\Rightarrow \text{notion de reste})$$

$$\blacktriangleright \Sigma_s = \text{ensemble solutions aux moindres carrés de } [A]s = [b]$$

Résolution du système linéaire bien contraint

$$\blacktriangleright \text{Hansen-Blik-Rohn-Ning-Kearfott : } [s] = \square \Sigma_s$$

$$\blacktriangleright \text{Newton : } [\xi] \leftarrow [\xi] \cap \hat{\xi} - [s]$$

Calculer la caractérisation aux moindres carrés

Linéarisation Taylor

- ▶ $[J_f([M], [\xi])]s = f([M], \hat{\xi})$

Reformulation en système linéaire bien contraint

- ▶ $[A] = [J_f([M], [\xi])]$ et $[b] = f([M], \hat{\xi})$

- ▶ Björck : $\begin{bmatrix} I & [A] \\ [A]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [r] \\ [s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b] \\ 0 \end{bmatrix}$ (\Rightarrow notion de reste)

- ▶ $\Sigma_s =$ ensemble solutions aux moindres carrés de $[A]s = [b]$

Résolution du système linéaire bien contraint

- ▶ Hansen-Blik-Rohn-Ning-Kearfott : $[s] = \square \Sigma_s$

- ▶ Newton : $[\xi] \leftarrow [\xi] \cap \hat{\xi} - [s]$

Calculer la caractérisation aux moindres carrés

Linéarisation Taylor

- ▶ $[J_f([M], [\xi])]s = f([M], \hat{\xi})$

Reformulation en système linéaire bien contraint

- ▶ $[A] = [J_f([M], [\xi])]$ et $[b] = f([M], \hat{\xi})$

- ▶ Björck : $\begin{bmatrix} I & [A] \\ [A]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [r] \\ [s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b] \\ 0 \end{bmatrix}$ (\Rightarrow notion de reste)

- ▶ $\Sigma_s =$ ensemble solutions aux moindres carrés de $[A]s = [b]$

Résolution du système linéaire bien contraint

- ▶ Hansen-Blik-Rohn-Ning-Kearfott : $[s] = \square \Sigma_s$

- ▶ Newton : $[\xi] \leftarrow [\xi] \cap \hat{\xi} - [s]$

Calculer la caractérisation aux moindres carrés

Linéarisation Taylor

- ▶ $[J_f([M], [\xi])]s = f([M], \hat{\xi})$

Reformulation en système linéaire bien contraint

- ▶ $[A] = [J_f([M], [\xi])]$ et $[b] = f([M], \hat{\xi})$

- ▶ Björck : $\begin{bmatrix} I & [A] \\ [A]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [r] \\ [s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b] \\ 0 \end{bmatrix}$ (\Rightarrow notion de reste)

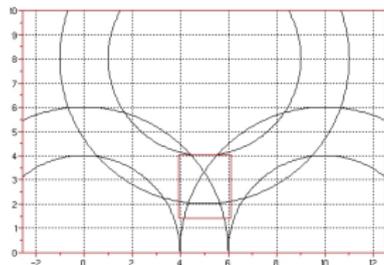
- ▶ $\Sigma_s =$ ensemble solutions aux moindres carrés de $[A]s = [b]$

Résolution du système linéaire bien contraint

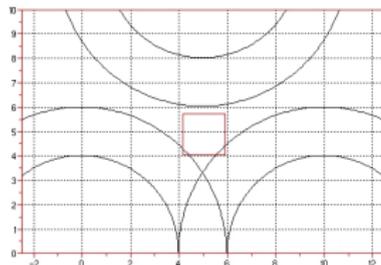
- ▶ Hansen-Blik-Rohn-Ning-Kearfott : $[s] = \square \Sigma_s$

- ▶ Newton : $[\xi] \leftarrow [\xi] \cap \hat{\xi} - [s]$

En simulation : intersection de cercles épais



Intersection : $0 \in [r] \equiv (0 \in [f])$



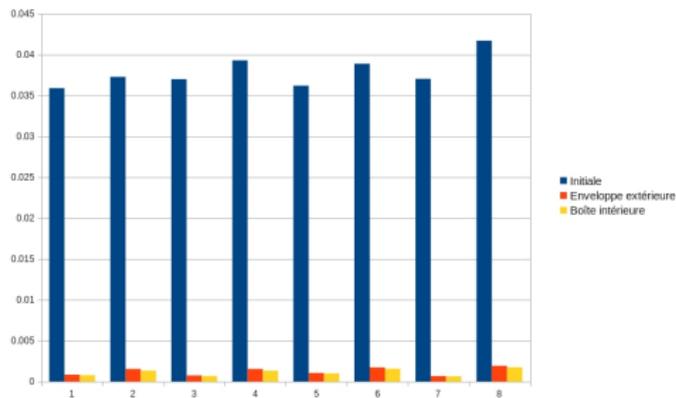
Pas intersection : $0 \notin [r] \Rightarrow 0 \notin [f]$

Résultats sur CoGiRo

Poses d'étalonnage

- ▶ 19 mesures dans le sous-espace de travail
- ▶ $[a_i]$ diamètre moyen 20 cm \Rightarrow diamètre moyen 3 cm

Tâche de validation



Diamètre de $[f]$ (en m)

	x	y	z
Init :	12.6	11.1	24
Étal :	2.7	2.2	14

Incertitude max de pose (en cm)

Discussion

Positifs

- ▶ Algorithme efficace pour enveloppe extérieure des solutions aux moindres carrés : proche de l'optimal (tests)
- ▶ Le reste $[r]$ pour savoir si $0 \notin [f]$

Négatifs

- ▶ Besoin de sur-estimer les incertitudes pour obtenir $0 \in [f]$
- ▶ Problème vite trop grand (Björck)

Calculer la caractérisation robuste à l'inconsistance

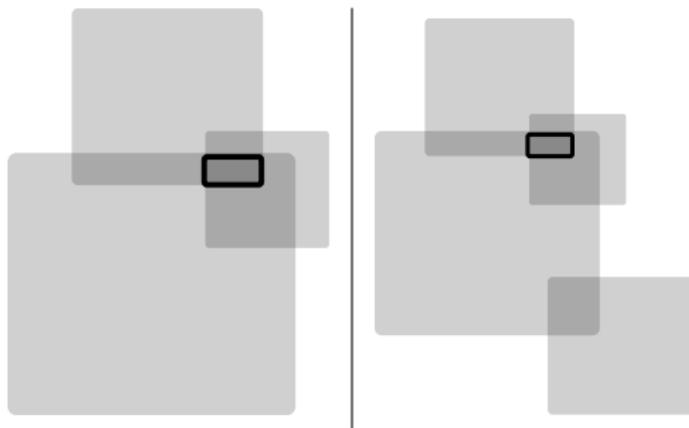
$$\Sigma_q = \{\xi \mid \exists_q k \in [1..N_C], \exists \hat{M}_k \in [M_k], f(\hat{M}_k, \xi) = 0\}$$

Programmation par contraintes

Une mesure = **une** contrainte ($f_k = 0$) \Rightarrow contraction de $[\xi]$

q -intersection : intersection de q boites parmi N_C

Satisfait q contraintes $\Rightarrow q$ mesures (\equiv oublie $N_C - q$ mesures)



Certification

Validation sur la tâche de palettisation

- ▶ $0 \in [f_k]$ pour toutes les poses de validation

	x	y	z
Init :	12.6	11.1	24
Étal :	5.0	3.1	21.1

Incertitude max de pose (en cm)

Discussion

- ▶ Incertitude encore importante sur les paramètres
⇒ Incertitude encore importante sur le positionnement
- ▶ Approche trop pessimiste : exploiter robustesse !
- ▶ Mauvais conditionnement dû à l'architecture du robot

Avec les intervalles

Gestion du câble

- ▶ Espace de travail : modèle simplifié acceptable
- ▶ Modèle épaissi : incertitude due à sa simplification

Identification de paramètres

- ▶ Nouvelle caractérisation du résultat et approche linéaire performante
- ▶ Programmation par contraintes : algorithme robuste



Alexandre dit Sandretto, J., Daney, D., and Gouttefarde, M. (2012a).
Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot.
In *RoManSy, Paris (France)*.



Alexandre dit Sandretto, J. and Merlet, J.-P. (2013).
Cable-driven robots for pedagogical and practical illustration in science and mathematics.
In *Congress in Numerical Methods in Engineering, Bilbao (Spain)*.



Alexandre dit Sandretto, J. and Nicolas, C. (2013).
Cable-driven robots with wireless control capability for pedagogical illustration in science.
In *Control Architectures of Robots, Angers (France)*.



Alexandre dit Sandretto, J., Trombettoni, G., and Daney, D. (2012b).
Confirmation of hypothesis on cable properties for cable-driven robots.
In *Eucomes, Santander (Spain)*.



Alexandre dit Sandretto, J., Trombettoni, G., and Daney, D. (2013a).
Confirmation of hypothesis on cable properties for cable-driven robots.
In *New Trends in Mechanism and Machine Science*, pages 85–93. Springer Netherlands.

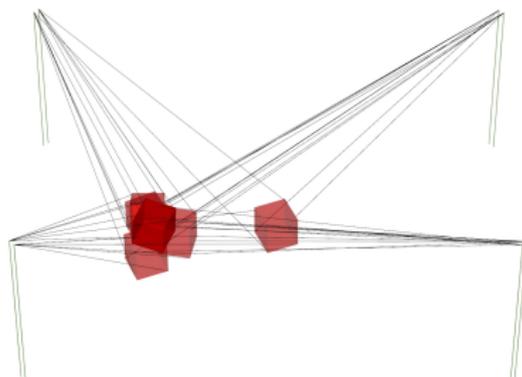


Alexandre dit Sandretto, J., Trombettoni, G., Daney, D., and Chabert, G. (2013b).
Certified calibration of a cable-driven robot using interval contractor programming.
In *Computational Kinematics, Barcelona (Spain)*.

Identifiabilité

Choix de configuration

-
- 1: Échantillonner : $\mathcal{L} = \{X_1, \dots, X_N\}$
 - 2: Initialiser : $\mathcal{Q} = \mathcal{L}(i, \dots, j)$ ($nb(i, \dots, j) = 10$)
 - 3: Calculer la jacobienne $J_{\xi}(\mathcal{Q})$
 - 4: Calculer le critère $Cond(J_{\xi})$
 - 5: **répéter**
 - 6: Ajouter à \mathcal{Q} un élément de \mathcal{L} s'il améliore le critère
 - 7: Enlever à \mathcal{Q} un élément de \mathcal{L} s'il ne dégrade pas le critère
 - 8: Échanger un élément de \mathcal{Q} avec un élément de \mathcal{L} s'il améliore le critère
 - 9: **jusqu'à** ce que le critère ne s'améliore plus
-



Poses obtenues pour l'étalonnage du robot CoGiRo dans le sous espace de travail

Sous contracteurs

Programmation par contracteurs

Pour allier performances des différents contracteurs \Rightarrow Composition

Contrainte par contrainte : HC4-Revise

$$f_k = \|[[\mathbf{p}_k] + [\mathbf{R}_k][\mathbf{b}] - [\xi]] \| - ([l_k] - [\sigma]) \quad k = [1 \dots N_C]$$

Sous système de 3 contraintes : Newton (3×3)

$$\begin{cases} f_s = \|[[\mathbf{p}_s] + [\mathbf{R}_s][\mathbf{b}] - [\xi]] \| - ([l_s] - [\sigma]) \\ f_t = \|[[\mathbf{p}_t] + [\mathbf{R}_t][\mathbf{b}] - [\xi]] \| - ([l_t] - [\sigma]) \\ f_u = \|[[\mathbf{p}_u] + [\mathbf{R}_u][\mathbf{b}] - [\xi]] \| - ([l_u] - [\sigma]) \end{cases}$$

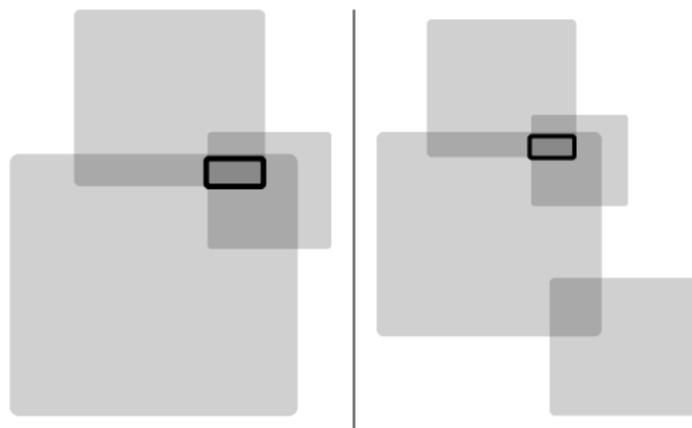
Choix de s, t, u : dans l'ordre \Rightarrow mauvais conditionnement, visant un conditionnement optimal \Rightarrow combinatoire et rentabilité faible, donc on préfère un choix aléatoire

Sous contracteur d'identification

$$[\xi]_{stu} = \text{PtFix}(\text{Rognage}(\text{Compo}(\text{HC4r}(f_s, f_t, f_u), \text{Newton}(f_{stu}))))$$

Schéma d'étalonnage

q-intersection : intersection de q boites parmi n



On veut q le plus élevé possible : besoin d'un algorithme adaptatif

Sous contracteur aléatoire

⇒ Plusieurs tirages

Schéma d'étalonnage

Contracteur d'identification

$$Etal_{1,N_C}(q, [a_i]) = PtFix(qinter(q, \{[\xi]_{123}, [\xi]_{\dots}, [\xi]_{..N_C}\}))$$

Algorithme d'identification

-
- 1: Mélanger aléatoirement la liste des N_C mesures
 - 2: Fixer q à 100%
 - 3: Initialiser $[a_i]$ à la valeur initiale
 - 4: **répéter**
 - 5: **pour** $j = 1 \rightarrow O$ **faire**
 - 6: $[a_i]_{etal} = Etal_{1,N_C}(q, [a_i])$
 - 7: **si** $[a_i]_{etal} \neq \emptyset$ **alors**
 - 8: $[a_i] = [a_i]_{etal}$ (la contraction est conservée)
 - 9: Mélanger aléatoirement la liste des N_C mesures
 - 10: Diminuer q de $h\%$
 - 11: **jusqu'à** $[a_i]$ soit contracté
-

$$O = 2N_C$$

$$h \approx 100/(N_C/3)\%$$

Robot pédagogique



- ▶ Modulaire
- ▶ Peu cher
- ▶ Contrôle sans fil
- ▶ Nombreuses démo
- ▶ > 300 élèves et visiteurs
- ▶ 2 conférences
- ▶ 1 bourse