

Du diagnostic/commande tolérante aux fautes au pronostic

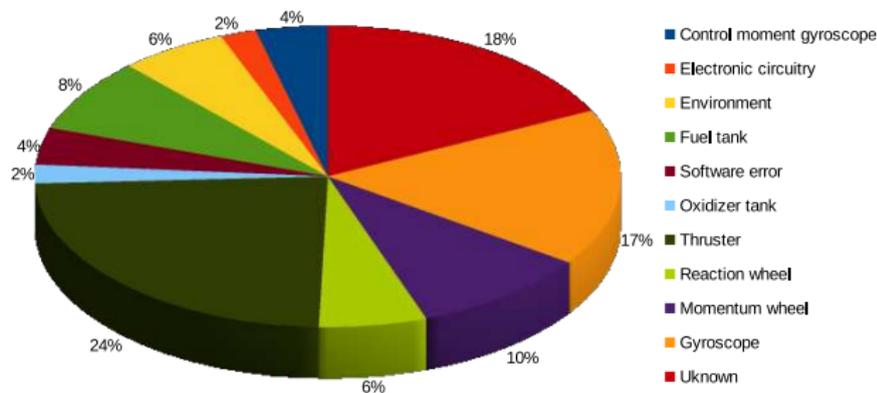
David Henry (david.henry@u-bordeaux.fr)

JD – JN MACS 2019
Juin 2019 – Bordeaux



Motivations

- 1 Etude conjointe IMS - ESA - Industries spatiales (ADS, TAS, GMV Space, DLR, CNES) sur les accidents (satellites telecom, mission de rendez vous, capture, arrimage, insertion sur orbite, etc..) ¹



- 2 Défaillances tuyères, roues inertielle et gyroscope $\approx 57\%$

1. D. Henry, F. Ankersen, L. Strippoli, "A class of Unknown Input Observers under H_∞ performance for Fault Diagnosis : Application to the Mars Sample Return mission", chapitre de l'ouvrage collectif "New Trends on Observer based Controller Design and their Applications", Series : "Emerging Methodologies and Applications in Modelling, Identification and Control"

Motivations

Liste non exhaustive des accidents...

<i>Spacecraft</i>	<i>Cause of the fault</i>
Lewis	Excessive thruster firings - Spins out of control (August 1997)
Iridium 27	Thruster anomaly depleted operational fuel (September 1997)
Nozomi	Thruster valve was stuck partially open and the propulsion system consumed more fuel than expected during Earth swingby (December 1998)
GOES-9	A momentum wheel was drawing high current resulting in hot operating conditions (July 1998)
Radarsat-1	Failure of the primary pitch momentum wheel failed due to excessive friction and temperature (September 1999)
Galaxy 8i	Three of four xenon ion thrusters failed (September 2000)
EchoStar V	Failure of one of the three momentum wheels (July 2001)
EchoStar VI	The spacecraft was hit by one or more micrometeorites, in its attitude control system causing a propellant leak in one of the thrusters (April 2001)
TOPEX	Failure of pitch reaction wheel (October 2005)
JCSat-1B	Attitude loss during manoeuvre due to thruster anomaly (January 2005)
GPS BI-05	Wheels 2 and 3 stopped completely with full motor voltage applied
Far Ultraviolet Spect. Explorer	Lost of two reaction wheels
Myriade	Occurrences of bubbles in the thrusters

Mission exoMars (19 Octobre 2016)

- déploiement des parachutes du module Schiaparelli à $12km$ d'altitude
- vitesse de descente : $1730km/h$
- longueur de ligne des parachutes : $27m$
- variation de pression $7 - 9tons$
- A engendrer des défauts IMUs \Rightarrow rétro-fusées coupées
- crash du module Schiaparelli
- vitesse d'impact sur le sol de Mars $300km/h$

figure confidentielle

Solutions

- Majorité des cas : défaillances non prévisibles
- Plusieurs analyses \Rightarrow au moins contenir leurs conséquences, voir mettre en place des "solutions analytiques"
- Pratique actuelle : AMDEC
 \Rightarrow solutions pré-calculées dans le logiciel bord
- nombre de systèmes/procédures d'accommodation croit de façon très importante avec le nombre de défaillances à couvrir
- Exemple : ATV-001
données confidentielles



Autres solutions envisageable : approches à base de modèle

Une solution basée modèle...

- C'est d'abord un problème hiérarchiquement bien posé

Level 1 sensor checks	Monitoring of the outputs of all sensors. This level covers most of the sensor faults such as sudden sensor death and lock-in-place fault types
Level 2 IMU/IMU IMU/STR	Interest is limited to the detection of failures not seen by level 1, e.g. slow drifts...
Level 3 thruster/IMU	Interest is faults in thrusters. The IMU hot redundancy enables to discard IMU failures, leading model-based techniques based on the IMUs to be viable candidates.
Level 3 wheel/tachometer	Covers wheels faults. The isolation is immediate since a tachometer is available on each wheel.
Level 4 approach corridors	Monitor the attitude/position/velocity of the chaser versus the approach corridors.
Level 4 collision risks	Detect if a collision may occur between the spacecraft
Level 4 mode success	Detect the divergence of the controllers outputs
Level 5 power alarm	Protection against ground operation errors and electrical sub-system failures

- Approche mixte signal (capteurs) / automatique (actionneurs)
- Utopique de croire que l'on peut tout faire ⇒ nécessite une redondance matérielle partielle
- Ne peut être envisagée en dehors des spécifications missions (Exemple : fuite d'ergol dans une tuyère. La procédure diffère selon que l'on considère la spec. énergétique ou non)

Diagnostic basé modèle

Diagnostic basé modèle

- 1 Deux communautés :
 - FDI : automatique / signal / analyse statistique :
⇒ travaux centrés sur la conception des algorithmes de diagnostic
 - DX : computer science et IA :
⇒ travaux particulièrement intéressants sur les problèmes de fautes multiples et de diagnosticabilité
- 2 Communauté FDI : Deux grandes classes de méthodes
 - Approches basées sur les méthodes d'estimation
⇒ Un problème d'optimisation « min »
 - Approches basées sur les approches génération de résidus
⇒ Un problème d'optimisation « min/max »

Diagnostic basé modèle

- ① Approches basées sur les méthodes d'estimation
 - Estimation de variables internes (états, états augmentés, paramètres)
 - Contexte "Kalmanien" (EKF, UKF, CKF, DDF, FP ...)
 - Techniques non linéaires « modes-glissants » (HOSM...)
 - Techniques ensemblistes

- ② Approches "Génération de résidus"
 - Espace de Parité
 - Approches à base d'observateurs : Obs. PI, adaptatif, UIO, iterative learning observer, modes glissants, techniques ensemblistes ..etc..
 - Approches à base de normes = approche par découplage approximatif

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Diagnosticabilité = bien poser le problème de diagnostic basé modèles
⇒ Approche basée sur la logique du 1er ordre avec prédicat + MNF.
Problème formulé comme un problème d'optimisation sous contrainte résolu par des techniques d'optimisation hybride
- Approche par observateurs modes glissants HOSM dont l'idée est d'estimer le défaut
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = système d'ordre peu élevé, perturbations lisses et bornées au sens l_∞ , problème d'immunité au bruit, à la présence de retard ...
- Approche LPV par avec contrainte gain- L_2/L_∞ dont l'idée est d'estimer $\underline{x}(t) \leq x(t) \leq \bar{x}(t)$ t.q. $\underline{x}(t)/\bar{x}(t)$ soient découplés des entrées inconnues découplables et robustes vis-à-vis des autres au sens l_2/l_∞
⇒ encore un exercice purement académique (système d'ordre très faible, pas de prise en compte de l'influence de la boucle fermée...)
- Approche filtres LPV de diagnostic (sans structure fixée *a priori*) avec contrainte gain- L_2/L_∞ par optimisation non lisse
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Diagnosticabilité = bien poser le problème de diagnostic basé modèles
⇒ Approche basée sur la logique du 1er ordre avec prédicat + MNF.
Problème formulé comme un problème d'optimisation sous contrainte résolu par des techniques d'optimisation hybride
- Approche par observateurs modes glissants HOSM dont l'idée est d'estimer le défaut
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = système d'ordre peu élevé, perturbations lisses et bornées au sens l_∞ , problème d'immunité au bruit, à la présence de retard ...
- Approche LPV par avec contrainte gain- L_2/L_∞ dont l'idée est d'estimer $\underline{x}(t) \leq x(t) \leq \bar{x}(t)$ t.q. $\underline{x}(t)/\bar{x}(t)$ soient découplés des entrées inconnues découplables et robustes vis-à-vis des autres au sens l_2/l_∞
⇒ encore un exercice purement académique (système d'ordre très faible, pas de prise en compte de l'influence de la boucle fermée...)
- Approche filtres LPV de diagnostic (sans structure fixée *a priori*) avec contrainte gain- L_2/L_∞ par optimisation non lisse
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes

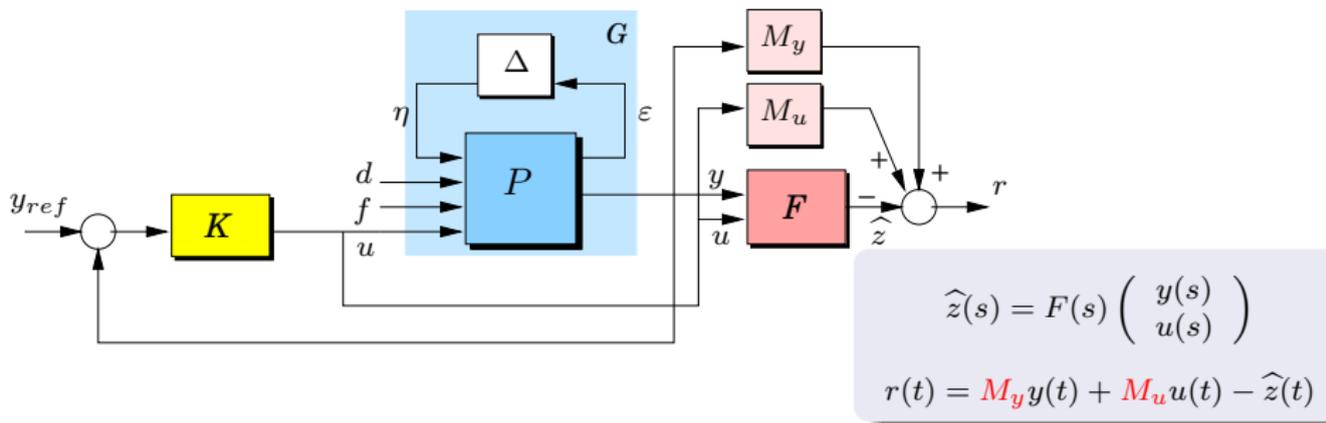
A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Diagnosticabilité = bien poser le problème de diagnostic basé modèles
⇒ Approche basée sur la logique du 1er ordre avec prédicat + MNF.
Problème formulé comme un problème d'optimisation sous contrainte résolu par des techniques d'optimisation hybride
- Approche par observateurs modes glissants HOSM dont l'idée est d'estimer le défaut
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = système d'ordre peu élevé, perturbations lisses et bornées au sens l_∞ , problème d'immunité au bruit, à la présence de retard ...
- Approche LPV par avec contrainte gain- L_2/L_∞ dont l'idée est d'estimer $\underline{x}(t) \leq x(t) \leq \bar{x}(t)$ t.q. $\underline{x}(t)/\bar{x}(t)$ soient découplés des entrées inconnues découplables et robustes vis-à-vis des autres au sens l_2/l_∞
⇒ encore un exercice purement académique (système d'ordre très faible, pas de prise en compte de l'influence de la boucle fermée...)
- Approche filtres LPV de diagnostic (sans structure fixée *a priori*) avec contrainte gain- L_2/L_∞ par optimisation non lisse
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Diagnosticabilité = bien poser le problème de diagnostic basé modèles
⇒ Approche basée sur la logique du 1er ordre avec prédicat + MNF.
Problème formulé comme un problème d'optimisation sous contrainte résolu par des techniques d'optimisation hybride
- Approche par observateurs modes glissants HOSM dont l'idée est d'estimer le défaut
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = système d'ordre peu élevé, perturbations lisses et bornées au sens l_∞ , problème d'immunité au bruit, à la présence de retard ...
- Approche LPV par avec contrainte gain- L_2/L_∞ dont l'idée est d'estimer $\underline{x}(t) \leq x(t) \leq \bar{x}(t)$ t.q. $\underline{x}(t)/\bar{x}(t)$ soient découplés des entrées inconnues découplables et robustes vis-à-vis des autres au sens l_2/l_∞
⇒ encore un exercice purement académique (système d'ordre très faible, pas de prise en compte de l'influence de la boucle fermée...)
- Approche filtres LPV de diagnostic (sans structure fixée *a priori*) avec contrainte gain- L_2/L_- par optimisation non lisse
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes

Approche gain- L_2/L_- non lisse



- Modélisation des incertitudes de modèles par technique LFT

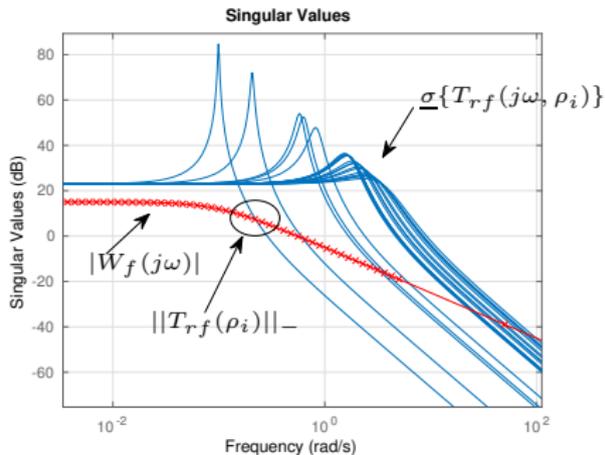
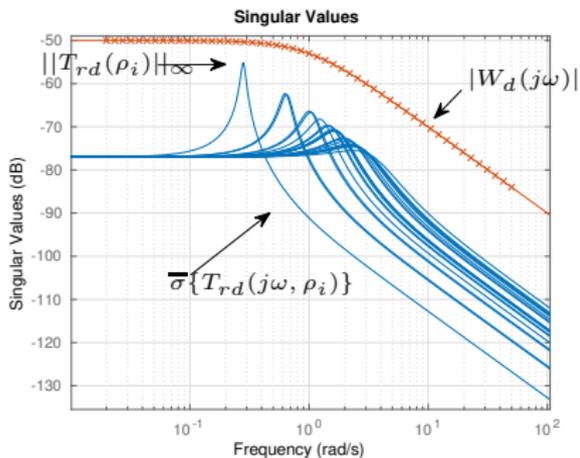
$$y = \mathcal{F}_u(P, \Delta(\rho)) \begin{pmatrix} d^T & f^T & u^T \end{pmatrix}^T, \Delta(\rho) : \|\Delta\|_{L_2} \leq 1, \\ \Delta(\rho(t)) = \text{block diag}(\delta_1^r(t)I_{k_1}, \dots, \delta_{m_r}^r(t)I_{k_{m_r}}), \delta_i^r(t) \in \mathbb{R}$$

- Prise en compte du régulateur LTI/LPV : $K(\rho) : \rho(t) \in \Psi$
- M_y, M_u : "fusion optimale" (au sens gain- L_2/L_-) des entrées/sorties $u(t)/y(t)$

Approche gain- L_2/L_- non lisse

Solution

- Passe par la notion de pondérations objectives
- En utilisant la définition du gain L_2 (Wei et Doyle, 1993) et du gain L_- (Henry, 2012)



$$\|T_{rd}(\rho)W_d^{-1}(\rho)\|_{L_2} < 1$$

$$\|T_{rf}(\rho)W_f^{-1}(\rho)\|_{L_-} > 1 \forall \omega \in \Omega$$

Approche gain- L_2/L_- non lisse

Solution

- condition suffisante : $\left\| \mathcal{F}_u \left(\mathcal{F}_l \left(\tilde{P}(M, \rho), F(\rho) \right), \Delta(\rho) \right) \right\|_{L_2} < 1$
- une formulation LMI (convexe)

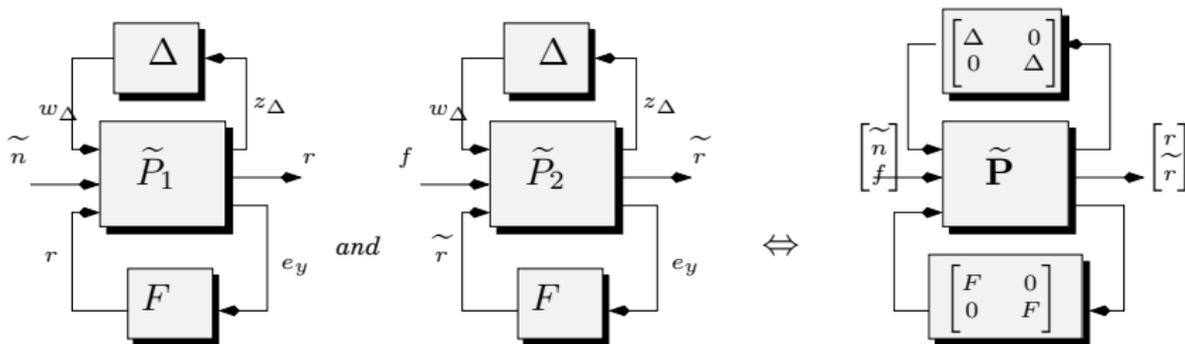
Mais ...

- ne considère, ni la structure de Δ , ni sa nature (éléments réels)
- existence d'effets de couplage conduisant à une solution sous-optimale
- $M_y, M_u, A_F, B_F, C_F, D_F$: pas de contraintes de structure, dimensions, dynamiques pré-déterminées, paramètres ajustables....

solution...

optimisation H_∞ non lisse

Approche gain- L_2/L_- non lisse



Principe de la démarche

- 1 Matrices de scaling $L_{\Delta \oplus \Delta}$ qui commutent avec $\text{diag}(\Delta, \Delta)$
 \Rightarrow reformuler la contrainte gain- L_2 en norme H_∞
- 2 Considérer que les termes diagonaux de \mathcal{F}_u ($\mathcal{F}_l(\tilde{P}(M, \rho), F(\rho)), \Delta(\rho)$)
 \Rightarrow se débarrasser des effets de couplage pour solution "plus optimale"

Alors...

$$\min_{M_y, M_u, F} \left\| \mathcal{F}_l \left(\mathcal{F}_u \left(\tilde{P}, \text{diag}(\Delta, \Delta) \right), \text{diag}(F, F) \right) \right\|_\infty$$

s.c. F stable, de structure fixée et/ou avec des paramètres ajustables

Approche gain- L_2/L_- non lisse

Formulation H_∞ non lisse

- Inspirée des travaux précurseurs de (Apkarian,2010)
- Degrés de libertés : $L_{\Delta \oplus \Delta}, M_y, M_u, A_F, B_F, C_F, D_F, \mathcal{W}_1, \mathcal{W}_2$
- On les range dans un vecteur $\chi \in \mathbb{R}^k$.

Le problème se formule alors comme :

$$\min_{\chi \in \mathbb{R}^k} f_\infty(x) := \max_{\omega \in [0, +\infty]} f(\omega, \chi)$$

- Ce problème d'optimisation est la composition de la fonction **convexe mais non lisse** $\max_{\omega} \bar{\sigma}(\cdot)$ avec la projection non convexe mais différentiable $\chi \rightarrow \mathcal{F}_l(P(j\omega), \chi)$
- Ce problème peut être résolu avec la stratégie par modèle tangent proposée par (Apkarian,2006)
- L'algorithme garantit la convergence vers une solution qui, malheureusement, est une solution locale (la fonction $f_\infty(x)$ étant non convexe)

Résumé et considérations pratiques

- Formulation LMI = converge vers un optimum global mais qui ne permet, ni de tenir compte de spécifications de structure/ordre, ni de la nature et structure des incertitudes ... et qui peut conduire à des filtres d'ordre très élevé
- Formulation H_∞ non lisse = une formulation qui pallie ces limitations mais converge vers un minimum local

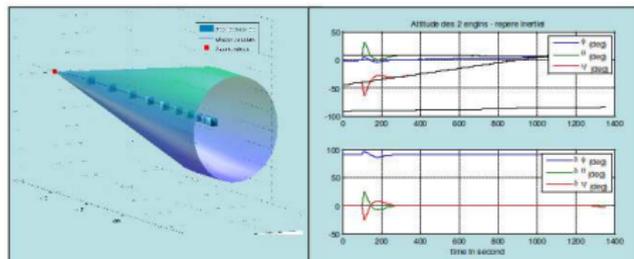
Solution pragmatique (sans garantie théorique)

- 1) Détermine M_y, M_u, F par solution LMI \Rightarrow solution optimal globale
 M_y^*, M_u^*, F^*
 - 2) Réduction de F^* : suppression des modes "peu" observables/commandables
 $\Rightarrow F_r$
 - 3) M_y^*, M_u^*, F_r = condition initiale pour la synthèse H_∞ non lisse
 - 4) Une valeur initiale de $L_{\Delta \oplus \Delta}$ peut être déterminée par μ -synthèse en stoppant les itérations à la première (matrices statiques)
- **Pratiquement : une solution d'ordre réduit proche de la solution optimale globale**
 - **Validation possible par post-analyse via la théorie des IQC**

Commande tolérante aux fautes

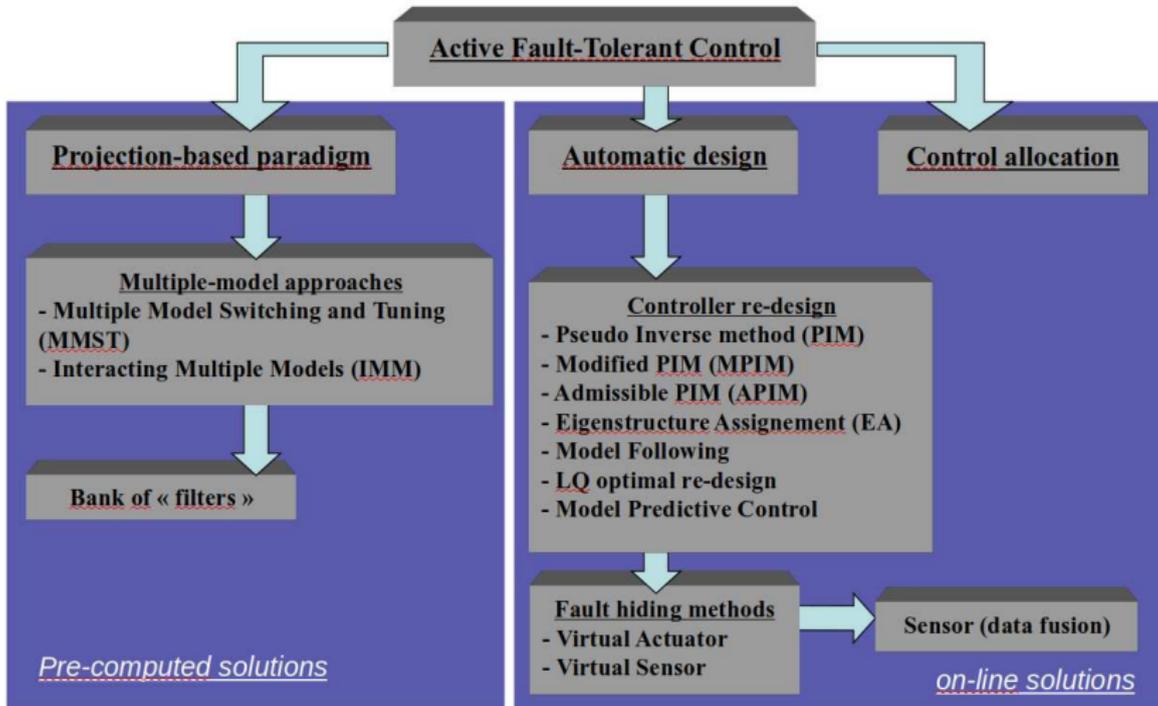
Commande tolérante aux fautes

- Fondamentalement un problème de commande (en présence de fautes)
- Lorsque le contrôle en place ne satisfait pas des critères *a priori fixés* (stabilité, $\|u(t)\|_2 \dots$)
- Exemple (iGNC) : tuyère ouverte
⇒ transitoire sur l'attitude et le position relative
⇒ mais les spec. missions (couloir de rendez-vous et orientation du système d'arrimage) = OK!
⇒ prix à payer consommation excessive d'ergol
- Approches passives / actives
 - Approches passives = un problème de commande robuste
 - Approches actives = réagissent à une information fournie par FDI



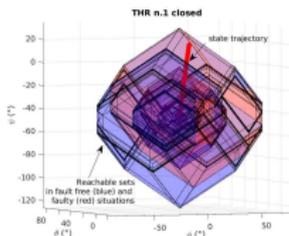
Commande tolérante aux fautes

Classification basée sur (Lunze et Richter, 2006)



A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Compensabilité/Recouvrabilité = bien poser le problème FTC

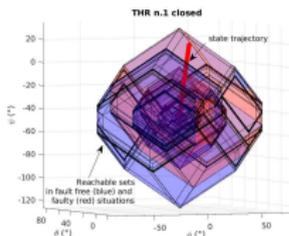


⇒ approche basée sur les espaces atteignables polytopiques (Reachable Sets)

- "Fault hidiers" avec prise en compte des saturations et dimensionnement par les domaines atteignables de la commande (approche Reachable Sets)
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes, e.g. IOA-GNC et COMRADE
- Approches par modes glissants basées sur la technique "super-twisting" formulée dans un contexte backstepping + HOSM pour \hat{f}
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = pas de panne franche, problème d'immunité au bruit, retard, dynamique de $\hat{f}(t)$...
- Approche supervisée basée sur la théorie des systèmes commutés à état partagé dont on contrôle la séquence de commutation
⇒ + "fault hidiers"... mais des problèmes actuellement ouverts (preuve formelle pas clairement établie ...)

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- **Compensabilité/Recouvrabilité = bien poser le problème FTC**

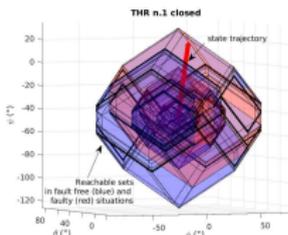


⇒ approche basée sur les espaces atteignables polytopiques (Reachable Sets)

- **"Fault hidiers" avec prise en compte des saturations et dimensionnement par les domaines atteignables de la commande (approche Reachable Sets)**
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes, e.g. IOA-GNC et COMRADE
- **Approches par modes glissants basées sur la technique "super-twisting" formulée dans un contexte backstepping + HOSM pour \hat{f}**
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = pas de panne franche, problème d'immunité au bruit, retard, dynamique de $\hat{f}(t)$...
- **Approche supervisée basée sur la théorie des systèmes commutés à état partagé dont on contrôle la séquence de commutation**
⇒ + "fault hidiers"... mais des problèmes actuellement ouverts (preuve formelle pas clairement établie ...)

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- **Compensabilité/Recouvrabilité = bien poser le problème FTC**

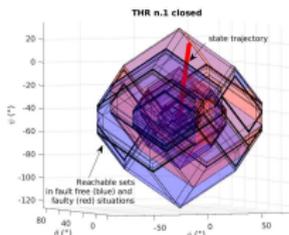


⇒ approche basée sur les espaces atteignables polytopiques (Reachable Sets)

- **"Fault hidiers" avec prise en compte des saturations et dimensionnement par les domaines atteignables de la commande (approche Reachable Sets)**
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes, e.g. IOA-GNC et COMRADE
- **Approches par modes glissants basées sur la technique "super-twisting" formulée dans un contexte backstepping + HOSM pour \hat{f}**
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = pas de panne franche, problème d'immunité au bruit, retard, dynamique de $\hat{f}(t)$...
- **Approche supervisée basée sur la théorie des systèmes commutés à état partagé dont on contrôle la séquence de commutation**
⇒ + "fault hidiers"... mais des problèmes actuellement ouverts (preuve formelle pas clairement établie ...)

A Bordeaux actuellement (équipe ARIA)

- Compensabilité/Recouvrabilité = bien poser le problème FTC



⇒ approche basée sur les espaces atteignables polytopiques (Reachable Sets)

- "Fault hidiers" avec prise en compte des saturations et dimensionnement par les domaines atteignables de la commande (approche Reachable Sets)
⇒ technique viable avec des transferts technologiques sur des systèmes spatiaux complexes, e.g. IOA-GNC et COMRADE
- Approches par modes glissants basées sur la technique "super-twisting" formulée dans un contexte backstepping + HOSM pour \hat{f}
⇒ encore un exercice plus ou moins académique = pas de panne franche, problème d'immunité au bruit, retard, dynamique de $\hat{f}(t)$...
- Approche supervisée basée sur la théorie des systèmes commutés à état partagé dont on contrôle la séquence de commutation
⇒ + "fault hidiers"... mais des problèmes actuellement ouverts (preuve formelle pas clairement établie ...)

Commande tolérante aux fautes

Approche supervisée : motivations

- FDI = solution optimale + FTC = commande optimale
- Deux solutions optimales mises ensemble
⇒ solution optimale globale ?
- Fausses alarmes = inévitables pratiquement
⇒ garantir la stabilité et la convergence des états contrôlés vers la référence après diagnostic OK

Objectifs

- Faire une synthèse des filtres de diagnostic + algo. de tolérance aux fautes sous un critère unique (solution optimale globale)
- Minimiser le temps de convergence des états contrôlés

Commande tolérante aux fautes

Solution

- un multi-estimateur de modes de fonctionnement

$$\dot{z}_i = A_i z_i + B_i u + \Gamma_i + L_i (y - C z_i), i = \overline{1, N}$$

- un banc de N correcteurs

$$\begin{aligned} - \dot{\xi}_i &= R_i \xi_i + K_i y \quad i = \overline{1, N} \\ - u &= S_i \xi_i + M_i y \end{aligned}$$

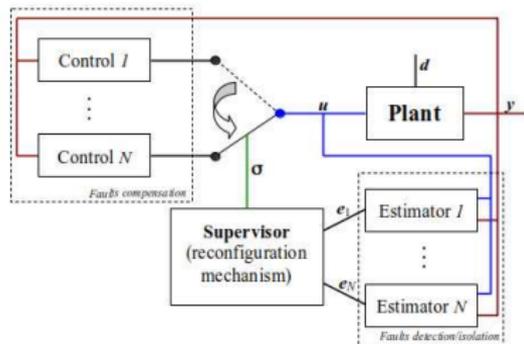
- peut être calculé avec n'importe quelle technique

- un superviseur basé sur la théorie du temps de séjour τ_D (min)

$$t_{k+1} = \underset{t \geq t_k + \tau_D}{\operatorname{arginf}} \left\{ |C e_{\sigma(t_k)}(t)| > |C e_j(t)|, j = \overline{1, N}, j \neq \sigma(t_k) \right\}$$

$$\sigma(t_k) = \underset{1 \leq j \leq N}{\operatorname{argmin}} |C e_j(t_k)|$$

$$\sigma(t) = \sigma(t_k) \quad \forall t_k \leq t \leq t_{k+1}$$

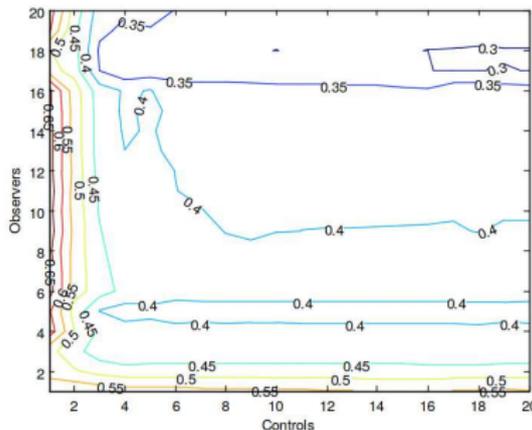


Commande tolérante aux fautes

- Comment calculer la solution optimale globale

courbes iso- τ_D

critère orienté commande (pôle le plus rapide, mesure H_2 , robustesse...) + critère orienté diagnostic (retard à la détection, taux de fausses alarmes...) + temps de séjour τ_D



- Possibilité de considérer des critères supplémentaires

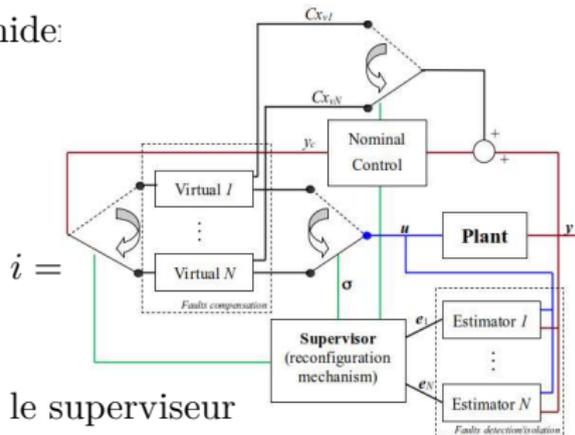
$$\underset{L_1, \dots, L_N; H_1, \dots, H_N}{\operatorname{argmin}} \quad l_1 \tau_D(L_1, \dots, L_N; H_1, \dots, H_N) + l_2 \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{\|W_i^L(s, L_i)\|_\infty}{W_i^s(0, L_i)} \right\} \\ + l_3 \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ \|W_i^H(s, H_i)\|_z \right\}, \quad z = \{2, \infty\}$$

Commande tolérante aux fautes

Amélioration des transitoires lors de la séquence de commutation

- utilisation du concept des "fault hide":

$$\begin{aligned}\dot{x}_{v_i} &= (A + B_i^* M_i) x_{v_i} + (B - B_i^*) y_c \\ u_{f_i} &= N_i y_c - N_i M_i x_{v_i} \\ N_i &= (B_i N_i)^+ B\end{aligned}$$



- introduction d'un hystérésis dans le superviseur

$$t_{k+1} = \underset{t \geq t_k + \tau_D}{\operatorname{arginf}} \left\{ |C e_{\sigma(t_k)}(t)| > \mathbf{h} |C e_j(t)|, j = \overline{1, N}, j \neq \sigma(t_k) \right\}$$

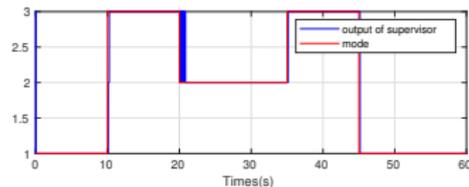
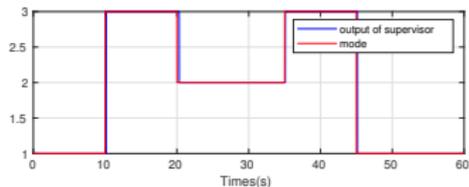
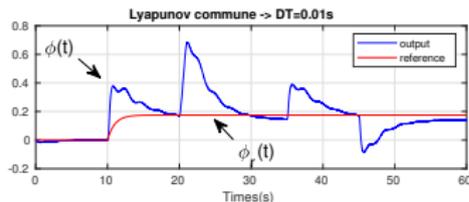
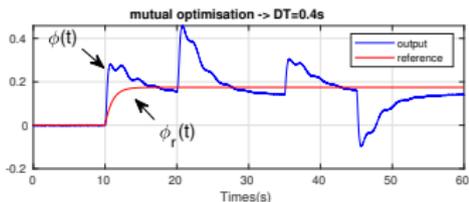
$$\sigma(t_k) = \underset{1 \leq j \leq N}{\operatorname{argmin}} |C e_j(t_k)|$$

$$\sigma(t) = \sigma(t_k) \quad \forall t_k \leq t \leq t_{k+1}$$

Commande tolérante aux fautes

Mise en évidence des points forts de la méthode :

- Manœuvre latérale d'un avion F-8 (ordre 4, 2 ailerons, états p, r, β, ϕ)
- Scénario : mode 1 = sans défaut / mode 2 = embardée aileron 1 / mode 3 = embardée aileron 2
- cas n.1 : $\tau_D = 0.4s$ / cas n.2 : Lyapunov commune à tous les modes



Bilan

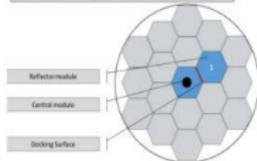
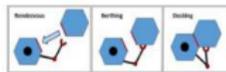
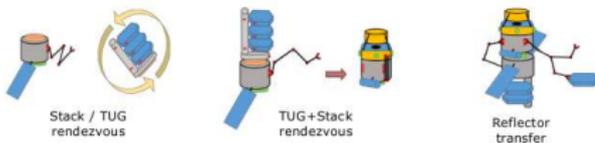
$\min \tau_D \neq$ meilleures performances (erreur de poursuite sur $\phi(t)$ augmente due au "chattering" du superviseur. Cause = bruit des erreurs $e_i(t), i = \overline{1,3}$)

Exemples d'applications

- 1 IOA-GNC (In Orbit Assembly GNC)
- 2 COMRADE (Control and Management of Robotics Active Debris Removal)

Projet IOA-GNC

- Projet Européen ESA + GMV
Space (leader) + TAS + IMS
- Objectif : assemblage autonome
d'un télescope en orbite Halo
autour du L2 (Nombre de
modules : 20)

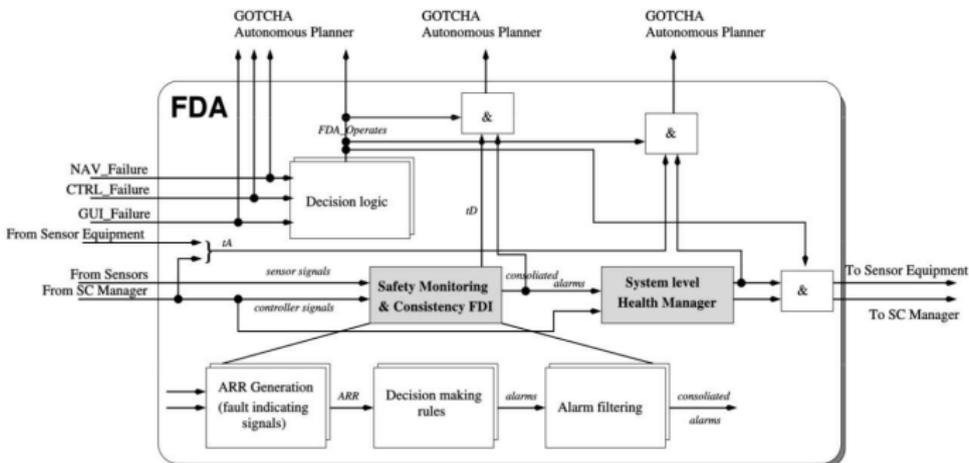


Développement d'un simulateur "très haute fidélité" comprenant un modèle d'éphéméride (SpaceLab ⇒ modèles des perturbations spatiales) + dynamiques (modes flexibles, incertitudes ...) + GNC complet ...etc..

Projet IOA-GNC

Considérations à prendre en compte...

- Disponibilité des ressources (NAV, CTRL, GUI dispo?)
- Planification de trajectoire à bord + CAM + Keep-Out Zones
⇒ Interactions avec les fonctions du "mission planner"
- FTC ⇒ Interactions avec les boucles de contrôle
- Nécessité d'interagir avec le staff "architecture système" .. terminologie?
 - Safety Monitoring & consistency FDI = fonctions FDI
 - System level Health Manager = fonctions FTC



Projet IOA-GNC

Une approche hiérarchisée

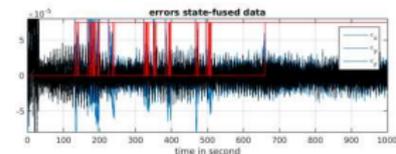
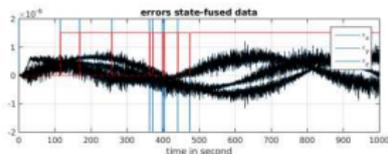
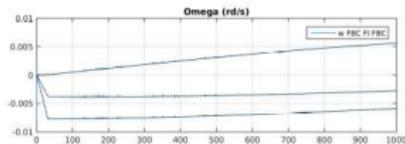
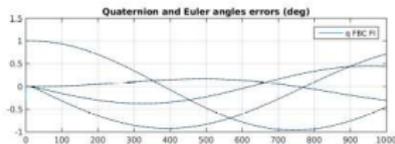
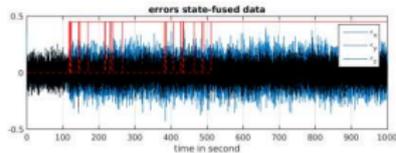
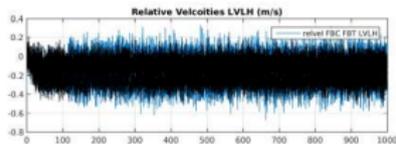
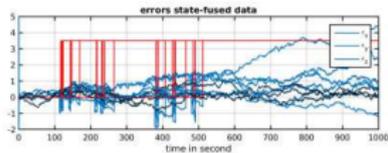
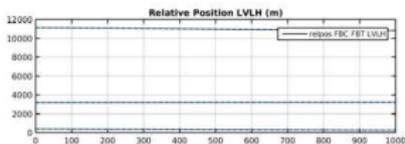
Autonomy level	Interest	FDI solution	FA solution
Level 1 sensor checks	severe sensor faults (dead sensor, abrupt bias...etc...)	checking the signal and its time derivative	Data fusion (UKF+ weighted RLS)
Level 2 WAC_1/NAC_1	Failures not seen by level 1	Parity Space (detection) + NL estimators (isolation)	Data fusion (UKF+ weighted RLS)
Level 2 WAC_2/NAC_2	Failures not seen by level 1	Parity Space (detection) + NL estimators (isolation)	Data fusion (UKF+ weighted RLS)
Level 2 IMU_1/IMU_2	Failures not seen by level 1	Parity Space (detection) + NL estimators (isolation)	Data fusion (UKF+ weighted RLS)
Level 2 STR_1/STR_2	Failures not seen by level 1	Parity Space (detection) + NL estimators (isolation)	Data fusion (UKF+ weighted RLS)
Level 3 THR/IMU/STR/WAC	This level covers any kind of faults in the thrusters	non smooth Hinf/H-filter (detection) + UIOs (isolation)	Fault Hiders + CA

En particulier :

- une approche signal pour les capteurs = espace de parité pour la détection + estimateurs NL pour l'isolation + fusion de données (UKF) pour l'accommodation
- une approche automatique pour les actionneurs = filtre H_∞/H_- non lisse pour la détection + banc UIOs pour l'isolation + fault hiders / CA pour l'accommodation

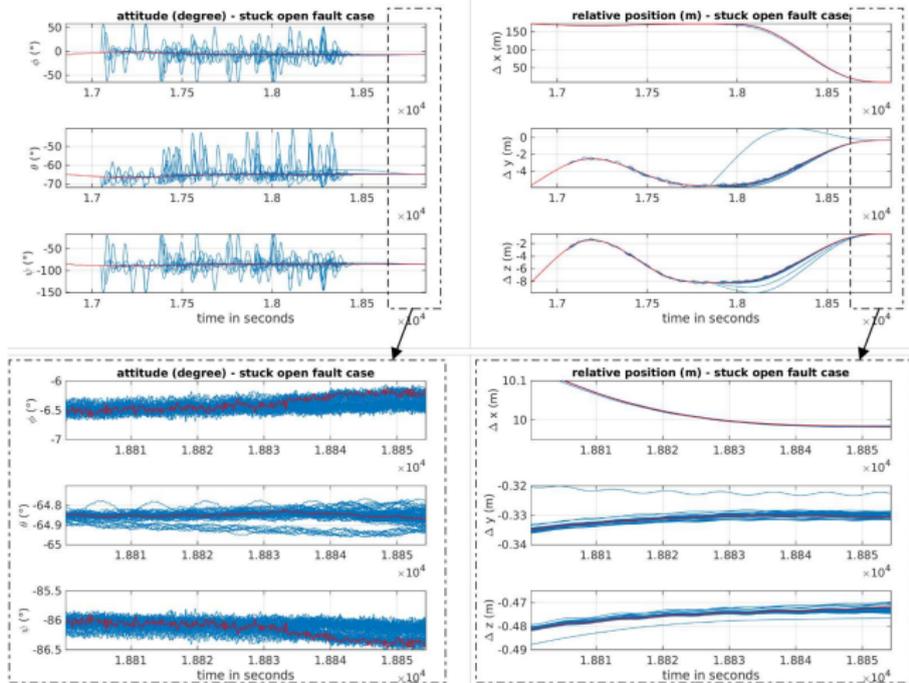
Projet IOA-GNC

Scenario : défauts aléatoires (biais, dérive, blocage) sur NAC/WAC - STR - IMU.
Défaut est maintenu après son apparition. Phase d'acquisition de la cible (distance relative sur $x \approx 11Km$)



Projet IOA-GNC

Scenario : tuyères ouvertes aléatoirement (240 simus) sur l'assemblage d'un miroir (zoom sur les opérations de proximité). Défaut est maintenu après son apparition.



Projet COMRADE

- Projet Européen ESA + GMV Space (leader) + ADS + DLR + PIAP + NTUA
- Objectif : capture du satellite ENVISAT
- Mort en 2012, 8.2 tonnes, $26m \times 10m \times 5m$
- Cible non coopérative et non passivée
- Utilisation d'une technologie particulière : bras robotisé (7 DOF)
- Grandes phases de la mission : synchronisation, déploiement du bras, capture d'Envisat et désorbitation contrôlée

Développement d'un simulateur "très haute fidélité" comprenant un modèle d'éphéméride (SpaceLab \Rightarrow modèles des perturbations spatiales) + dynamiques (modes flexibles pour Envisat, ballottements carburant pour le chasseur, incertitudes ...) + GNC complet chasseur + modèle du robot (simscape) + modèle d'impact (contact simscape library)...etc...

Projet COMRADE

Objectif de tolérance aux fautes

- Tuyères ouvertes ou fermées
 - Diagnostic : une classe particulière d'UIO "NL LPV" sous contrainte gain- L_2

$$\begin{aligned}\dot{z} &= N(\rho(t))z + T(\rho(t))\phi_\varepsilon + H(\rho(t))u + L_1(\rho(t))y \\ \hat{x} &= z - L_2(\rho(t))y \\ e_y &= \hat{y} - y = C\hat{x} - y\end{aligned}$$

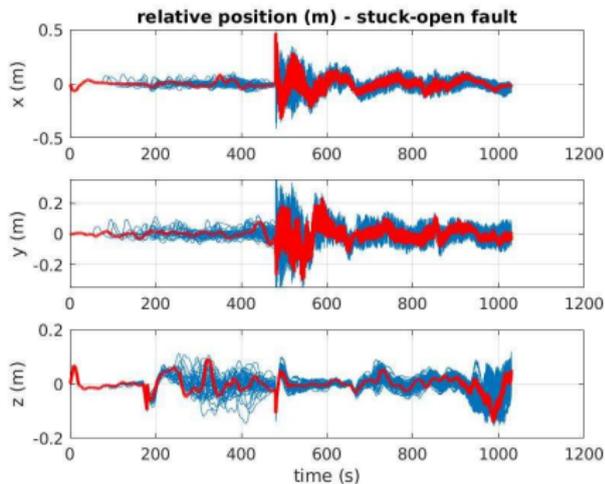
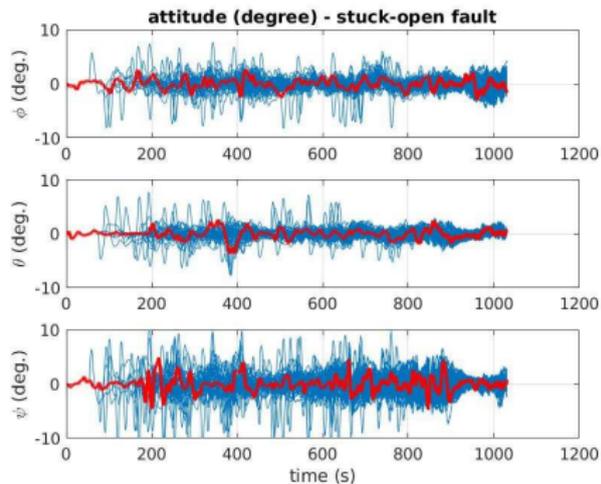
où $\phi_\varepsilon = \phi(\varepsilon \text{sat}(\omega), \rho(t))$

- FTC : Deux approches proposées : CA avec action intégrale + "fault hidiers"
- "Grippage" des articulations du robot
 - Diagnostic : juste un modèle de performance = retard
 - FTC : stratégie de prédiction des commandes moteurs $\tau(t)$ basée sur l'utilisation de la Jacobienne avec stratégie d'évitement des singularités

Projet COMRADE

Scenario : sans défaut (50 simus) + tuyères 1,5,13,17 ouvertes aléatoirement (400 simus) lors de la phase de synchronisation.

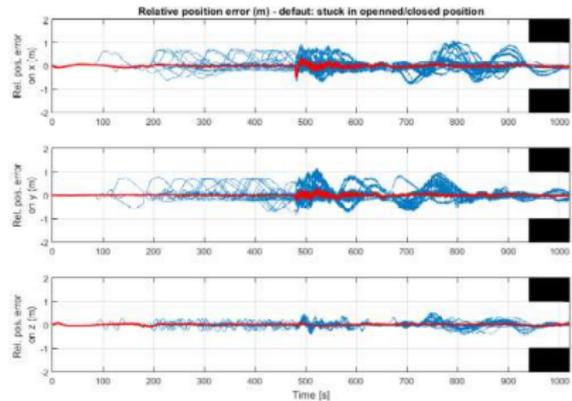
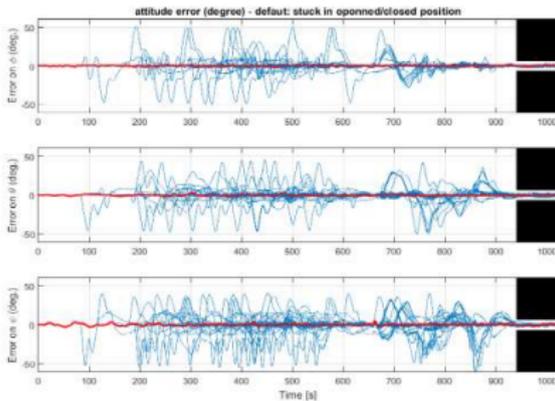
Algo FTC : CA avec action intégrale



Projet COMRADE

Scenario : sans défaut (10 simus) + tuyères 1,5,13,17 ouvertes/fermées aléatoirement (60 simus) lors de la phase de synchronisation.

Algo FTC : "fault hidens"



Pronostic basé modèle

Pronostic

- Consiste à prédire l'état futur de santé d'un système
- A estimer son temps de vie restant avant l'apparition d'un défaut
- Trois grandes classes d'approches :
 - méthodes basées sur l'expertise (approches fiabilistes, à base de systèmes experts)
 - les techniques "data driven" (analyse de tendance de mesures/critères, méthodes par apprentissage ...)
 - les approches basées modèles (Bordeaux)

Pronostic

Approches basées modèles

$\dot{\phi} = h(x, \phi, \rho, z)$ = dynamique de la dégradation

$\dot{x} = f(x, u, \rho, \phi, v)$ = dynamique de l'état

$y = g(x, u, \rho, \phi, w)$ = équation de mesure

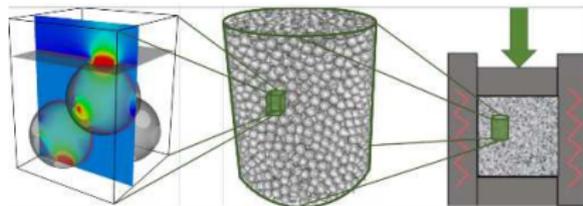
⇒ toutes les approches de diagnostic basées modèles sont des approches candidates

Mais ...

- modèle multi-échelle de temps ⇒ des difficultés numériques plus ou moins résolues
- le modèle de la dégradation n'est pas connu ⇒ possibilité de "fitter" des modèles approximatifs (interpolations polynomiales, spline...etc...)
- une idée de garantir la prédiction de l'état futur de santé ⇒ préférer les approches ensemblistes robustes

Pronostic

A Bordeaux... deux axes de recherche



- Modélisation

- modèle du phénomène de vieillissement ?
- du modèle microscopique/mésoscopique au modèle d'état ?
 - ⇒ techniques de réduction de modèle
 - ⇒ Constrained Non-Linear Programming Problem (CNLPP)
- couplage dans l'équation d'état $\dot{x} = f(x, u, \rho, \phi, v)$?

collaboration récente avec l'I2M

Pronostic

● Méthode de prédiction

- Pronostic = une idée de **garantir** la prédiction de l'état futur de santé \Rightarrow approches ensemblistes robustes
- UIO LPV ensembliste avec contrainte gain- L_2/L_∞ (approche polytopique)

$$\dot{\underline{z}} = L(\rho)\underline{z} + (M(\rho) + L(\rho)N)y + \underline{\eta}(\underline{r}, \underline{r}, \underline{w}, \underline{w}, \rho)$$

$$\underline{r} = \underline{z} + Ny + \underline{\varphi}(\underline{w}, \underline{w}, \rho)$$

$$\underline{x} = \underline{g}(\underline{r}, \underline{r}, \rho)$$

$$\dot{\underline{z}} = L(\rho)\underline{z} + (M(\rho) + L(\rho)N)y + \underline{\eta}(\underline{r}, \underline{r}, \underline{w}, \underline{w}, \rho)$$

$$\underline{r} = \underline{z} + Ny + \underline{\varphi}(\underline{w}, \underline{w}, \rho)$$

$$\underline{x} = \underline{g}(\underline{r}, \underline{r}, \rho)$$

t.q.

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$$

$$x \perp \max \text{ d'entrées découplables}$$

$$\min \|\bar{x} - \underline{x}\|_z, z = \{2, \infty\}$$

une formulation LMI basée sur AQS (Lyapunov dépendant de ρ)
ne nécessite pas une recherche explicite de la propriété de coopérativité (Meztlar)

En conclusion ...

Conclusion

- Beaucoup de méthodes dans les labos
- En diagnostic :
 - problème de détection réglé
 - pas vraiment le cas du problème d'isolation
 - problème de *diagnosticabilité*
 - il est temps d'avoir des applications complexes réelles !
- En commande tolérante aux fautes :
 - problème de *reconfigurabilité*, de *compensabilité*
 - la gestion des commutations face aux fausses alarmes inévitables
 - couplage FDI/FTC
- En pronostic :
 - modèle des phénomènes de dégradation
 - modèles multi-échelles de temps

Du diagnostic/commande tolérante aux fautes au pronostic

David Henry (david.henry@u-bordeaux.fr)

JD – JN MACS 2019
Juin 2019 – Bordeaux

