

Commandes et Observateurs Non-linéaires pour la Robotique Mobile

Minh Duc HUA

ISIR - UPMC/CNRS UMR7222

Journées Travail sous-marin, ONERA, 15-16 Jan. 2014



Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référéncée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires

- **Ingénieur Ecole Polytechnique X-ENSTA (2006)**
- **Docteur de l'Université Nice Sophia-Antipolis (2009)**
Contrôle non-linéaire des VTOLs, Observateur non-linéaire d'attitude
Supervisé par [P. Morin](#), [T. Hamel](#) et [C. Samson](#)
Thèse préparée à INRIA Sophia-Antipolis
- **Post-Doc à I3S UNS-CNRS (2 ans, 2009-2011)**
Téléopération des drones, Observateurs non-linéaires, Contrôle sous-optimal en temps
Avec [T. Hamel](#), [C. Samson](#), [G. Allibert](#), [G. Ducard](#), [H. Rifai](#), ...
- **Visiteur de l'ANU (Australian National University)**
(1.5 mois, 2010), invité par [R. Mahony](#)
- **CR2 CNRS à ISIR UPMC-CNRS (depuis Oct. 2011)**

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référencée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires

Mes recherches (théoriques + pratiques) sont fortement liées à la robotique aérienne et sous-marine:

- 1) **Commande basée l'état des véhicules sous-actionnés.**
- 2) **Commande référencée capteurs des UAVs et AUVs.**
- 3) **Fusion multi-capteurs et estimation d'état.**

en s'intéressant particulièrement aux aspects **performance** et **robustesse**.

Motivations – Commande des véhicules sous-actionnés

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référéncée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires



La famille de véhicules à propulsion centrale

Constatations :

- Manque d'une théorie de commande unificatrice.
- Caractéristiques communes des véhicules à propulsion centrale :
 - Systèmes sous-actionnés,
 - Une force de poussée centrale,
 - Actionnement complet de l'orientation.

Motivation théorique :

- développer une théorie de commande non-linéaire **unificatrice**.

Motivations pratiques :

- élargir le **domaine de fonctionnement**,
- accroître la **robustesse**.

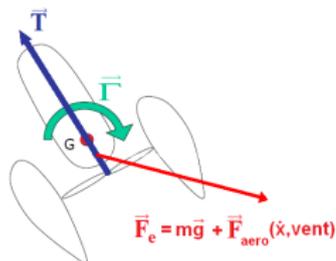
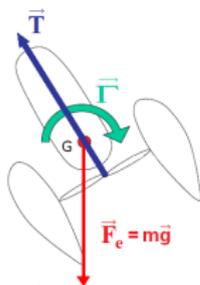
Commande unificatrice des VTOLs

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

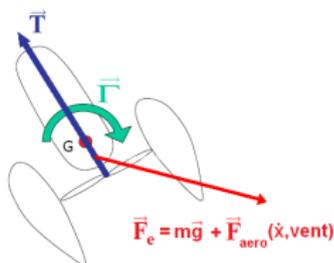
Observateurs Non-linéaires



Approches dans la littérature

[Hua, Hamel, Morin, Samson, IEEE-TAC'09, CSM'13]

- **Domaine de stabilité quasi-global;**
- **Performante:** enveloppe de vol large, vitesse élevée, manoeuvres complexes et agressives (looping).
- **Robuste:** (*perturbations aérologiques + erreurs de modèle*)
- **Unificatrice et générique:**
 - ▶ s'applique de la même façon à tous les VTOLs.



Equations (formalisme de Newton-Euler)

$$\begin{cases} (\Sigma_1) : \begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ \dot{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -TRe_3 + F_e(\dot{x}, t) \\ R\Omega_{\times} \end{bmatrix} \\ (\Sigma_2) : I\dot{\Omega} = -\Omega_{\times}I\Omega + \Gamma + \Gamma_e \end{cases}$$

⇒ Utiliser T , Ω pour contrôler Σ_1

Remarques

- **Parametrization de l'orientation:** éviter angles d'Euler, utiliser matrice de rotation ou quaternions.
- **Hypothèse de corps sphérique $\vec{F}_e \approx \vec{F}_e(\dot{x}, t)$:** s'applique aux véhicules à faible portance (e.g., multi-rotors, hélicoptères, ducted-fans).

Dynamique de translation

$$m\ddot{x} = -T\eta + F_e(\dot{x}, t), \text{ avec } \eta \triangleq Re_3$$

Equilibre $\ddot{x} \equiv 0$ implique

$$T\eta = F_e(\dot{x}, t)$$

Si $F_e(\dot{x}, t) = 0$, PROBLEME OUVERT !

- Infinité d'équilibre: $T\eta = 0$, η_D non défini.
- Système est contrôlable mais son linéarisé n'est pas.
- Pas de commande à retour d'état continue qui stabilise l'équilibre asymptotiquement (théorème de Brockett).

Dynamique de translation

$$m\ddot{x} = -T\eta + F_e(\dot{x}, t), \text{ avec } \eta \triangleq Re_3$$

Equilibre $\ddot{x} \equiv 0$ implique

$$T\eta = F_e(\dot{x}, t)$$

Si $F_e(\dot{x}, t) = 0$, PROBLEME OUVERT !

- Infinité d'équilibre: $T_d = 0$, η_d non défini.
- Système est contrôlable mais son linéarisé n'est pas.
- Pas de commande à retour d'état continue qui stabilise l'équilibre asymptotiquement (théorème de Brockett).

Dynamique de translation

$$m\ddot{x} = -T\eta + F_e(\dot{x}, t), \text{ avec } \eta \triangleq Re_3$$

Equilibre $\ddot{x} \equiv 0$ implique

$$T\eta = F_e(\dot{x}, t)$$

Si $F_e(\dot{x}, t) \neq 0$, [Hua, Hamel, Morin, Samson, IEEE-TAC'09, CSM'13]

- 2 équilibres $(T_d, \eta_d) = \left(\pm |F_e|, \pm \frac{F_e}{|F_e|} \right)$.
- Fixer $T = T_d$ et utiliser $\Omega_{1,2}$ pour aligner η à η_d

$$\Omega_{1,2} = \left(R^\top \left(k_0 \frac{\eta \times \eta_d}{(1 + \eta^\top \eta_d)^2} - (\eta \times)^2 (\eta_d \times \dot{\eta}_d) \right) \right)_{1,2}$$

Proof: Lyapunov func. $\mathcal{L} = 1 - \eta^\top \eta_d$, $\dot{\mathcal{L}} = -k_0 \frac{|\eta \times \eta_d|^2}{(1 + \eta^\top \eta_d)^2} \leq 0$

- Ω_3 est libre pour contrôler le lacet.

Dynamique de l'error de translation $\tilde{x} \triangleq x - x_r$

$$m\ddot{\tilde{x}} = \underbrace{-\beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})}_{\text{Système nominal}} \quad \underbrace{-T\eta + F(\dot{x}, t)}_{\text{Partie à réguler à zero}}$$

Système nominal

Partie à réguler à zero

globalement stable

avec $F(\dot{x}, t) \triangleq F_e(\dot{x}, t) - m\ddot{x}_r + \beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$

Equilibre $\tilde{x} = \dot{\tilde{x}} = \ddot{\tilde{x}} \equiv 0$ implique $T\eta = F(\dot{x}, t)$

Si $F(\dot{x}, t) \neq 0$, on peut procéder comme avant

- Pour éviter que $F(\dot{x}, t)$ s'annule, choisir $\beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$ bornée par le poids de véhicule.

Dynamique de l'error de translation $\tilde{x} \triangleq x - x_r$

$$m\ddot{\tilde{x}} = \underbrace{-\beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})}_{\substack{\text{Système nominal} \\ \text{globalement stable}}} \quad \underbrace{-T\eta + F(\dot{x}, t)}_{\text{Partie à réguler à zero}}$$

avec $F(\dot{x}, t) \triangleq F_e(\dot{x}, t) - m\ddot{x}_r + \beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$

Equilibre $\tilde{x} = \dot{\tilde{x}} = \ddot{\tilde{x}} \equiv 0$ implique $T\eta = F(\dot{x}, t)$

Si $F(\dot{x}, t) \neq 0$, on peut procéder comme avant

- Pour éviter que $F(\dot{x}, t)$ s'annule, choisir $\beta(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})$ bornée par le poids de véhicule.

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référencée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires

Si $\vec{F}_e(R, \dot{x}, t) \sim R$, alors

$$\dot{\eta}_d \sim \Omega, \text{ car } \eta_d = \pm F_e / |F_e|$$

$$\Rightarrow \Omega_{1,2} = \left(R^T \left(k_0 \frac{\eta \times \eta_d}{(1 + \eta^T \eta_d)^2} - (\eta \times)^2 (\eta_d \times \dot{\eta}_d) \right) \right)_{1,2} \sim \Omega$$

$\Rightarrow \Omega_{1,2}$ est implicite.

Modifications pour le cas $\vec{F}_e \approx \vec{F}_e(R, \dot{x}, t)$

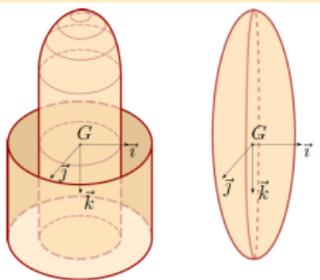
Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

Si $\vec{F}_e(R, \dot{x}, t) \sim R$, alors



Pour corps bi-symétrique, possible de décomposer [Pucci, Hamel, Morin, Samson, 2012]:

$$\vec{F}_e(R, \dot{x}, t) = F_{e,1}(R, \dot{x}, t)\vec{\eta} + \vec{F}_{e,2}(\dot{x}, t)$$

$$\Rightarrow \boxed{m\ddot{x} = -\bar{T}\eta + F_{e,2}(\dot{x}, t)} \quad \text{avec } \bar{T} \triangleq T - F_{e,1}(R, \dot{x}, t)$$

Perspectives:

- Généralisation aux avions et convertibles.
- Généralisation aux véhicules soumis à la masse ajoutée (sous-marins et dirigeables). $F_e = F_e(\dot{x}, \ddot{x}, R, \omega, \dot{\omega}, t)$. Projet PEPS en cours.

Modifications pour le cas $\vec{F}_e \approx \vec{F}_e(R, \dot{x}, t)$

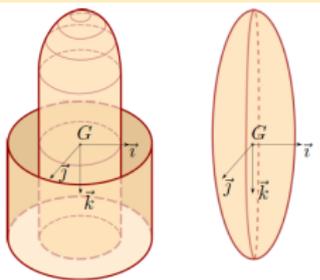
Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

Si $\vec{F}_e(R, \dot{x}, t) \sim R$, alors



Pour corps bi-symétrique, possible de décomposer [Pucci, Hamel, Morin, Samson, 2012]:

$$\vec{F}_e(R, \dot{x}, t) = F_{e,1}(R, \dot{x}, t)\vec{\eta} + \vec{F}_{e,2}(\dot{x}, t)$$

$$\Rightarrow \boxed{m\ddot{x} = -\bar{T}\eta + F_{e,2}(\dot{x}, t)} \quad \text{avec } \bar{T} \triangleq T - F_{e,1}(R, \dot{x}, t)$$

Perspectives:

- Généralisation aux avions et convertibles.
- Généralisation aux véhicules soumis à la masse ajoutée (sous-marins et dirigeables). $F_e = F_e(\dot{x}, \ddot{x}, R, \omega, \dot{\omega}, t)$. **Projet PEPS en cours.**

Robustification de la Commande par des nouvelles techniques d'intégrateur Anti-Windup (1/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

- C'est une extension des PI, PID classiques.
- Exemple: le terme de correction intégral classique est

$$z = \int_0^t \tilde{x}(s) ds \quad \sim \quad \dot{z} = \tilde{x}$$

⇒ z n'est pas borné et désature lentement (i.e. problème de windup intégral)

Robustification de la Commande par des nouvelles techniques d'intégrateur Anti-Windup (1/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

- C'est une extension des PI, PID classiques.
- Exemple: le terme de correction intégral classique est

$$z = \int_0^t \tilde{x}(s) ds \quad \sim \quad \dot{z} = \tilde{x}$$

⇒ z n'est pas borné et désature lentement (i.e. problème de windup intégral)

Robustification de la Commande par des nouvelles techniques d'intégrateur Anti-Windup (1/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

- C'est une extension des PI, PID classiques.
- **Nouveau intégrateur borné [Hua & Samson, IJC'11]:**

$$\ddot{z} = -k_{vz}\dot{z} + \text{sat}_{\ddot{z}_{max}/2}(k_{pz}(-z + \text{sat}_{\Delta_z}(z + \tilde{x})))$$

avec $z(0) = \dot{z}(0) = 0$, $\text{sat}_{(\cdot)}$ fonction de saturation classique, et $k_{vz}, k_{pz}, \Delta_z, \ddot{z}_{max} > 0$.

$\Rightarrow z, \dot{z}, \ddot{z}$ sont bornés et peuvent être désaturés rapidement.

$$|z| < \Delta_z + \ddot{z}_{max}/(2k_{vz}^2), \quad |\dot{z}| < \ddot{z}_{max}/(2k_{vz}), \quad |\ddot{z}| < \ddot{z}_{max}.$$

Robustification de la Commande par des nouvelles techniques d'intégrateur Anti-Windup (2/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

$$\ddot{z} = -k_{vz}\dot{z} + \text{sat}_{\dot{z}_{max}/2}(k_{pz}(-z + \text{sat}_{\Delta_z}(z + \tilde{x})))$$

Dynamique de l'erreur étendue $\bar{x} \triangleq \tilde{x} + z$

$$\underbrace{m\ddot{\bar{x}} = -\beta(\bar{x}, \dot{\bar{x}})}_{\text{Système nominal}} \quad \underbrace{-T\eta + F(\dot{x}, t)}_{\text{Partie à réguler à zero}}$$

globalement stable

avec $F(\dot{x}, t) \triangleq F_e(\dot{x}, t) - m\ddot{x}_r - m\ddot{z} + \beta(\bar{x}, \dot{\bar{x}})$

Si $F(\dot{x}, t) \neq 0$, on peut procéder comme avant

- Pour éviter que $F(\dot{x}, t)$ s'annule, choisir \dot{z}_{max} petit.

Robustification de la Commande par des nouvelles techniques d'intégrateur Anti-Windup (2/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

$$\ddot{z} = -k_{vz}\dot{z} + \text{sat}_{\dot{z}_{max}/2}(k_{pz}(-z + \text{sat}_{\Delta_z}(z + \tilde{x})))$$

Dynamique de l'erreur étendue $\bar{x} \triangleq \tilde{x} + z$

$$\underbrace{m\ddot{\bar{x}} = -\beta(\bar{x}, \dot{\bar{x}})}_{\text{Système nominal}} \quad \underbrace{-T\eta + F(\dot{x}, t)}_{\text{Partie à réguler à zero}}$$

globalement stable

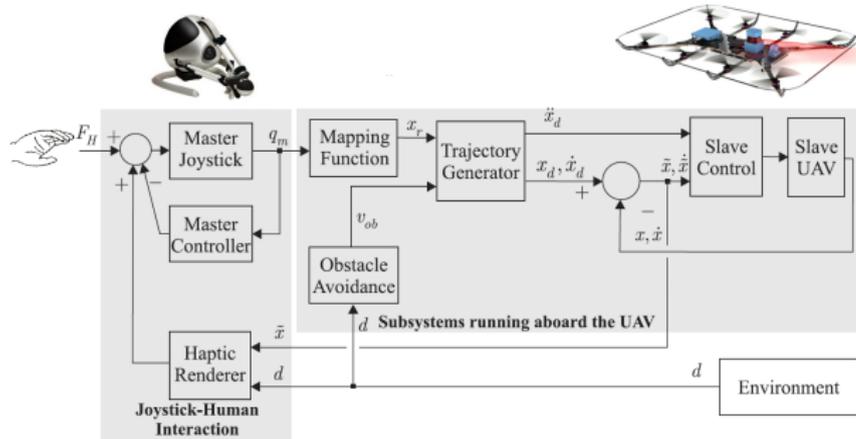
avec $F(\dot{x}, t) \triangleq F_e(\dot{x}, t) - m\ddot{x}_r - m\ddot{z} + \beta(\bar{x}, \dot{\bar{x}})$

Si $F(\dot{x}, t) \neq 0$, on peut procéder comme avant

- Pour éviter que $F(\dot{x}, t)$ s'annule, choisir \ddot{z}_{max} petit.

Commande unificatrice des VTOLs

Application à la Téléopération Bilatérale



[Omari, Hua, Ducard, Hamel, ICRA'13]

- **Evitement d'Obstacles Automatique**
 - ➔ Capteurs pour détection d'obstacle (laser, sonar, ...)
- **Téléopération Bilatérale**
 - ➔ Sentir l'environnement avec l'aide de Joystick à retour de force

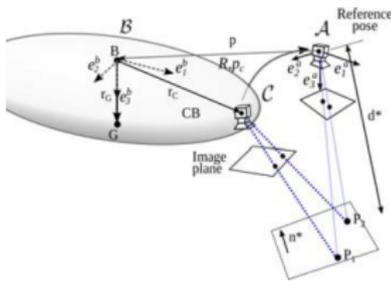
Homography-based Visual Servoing for AUVs (1/2)

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référencée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires



Objective:

Stabilise the **fully-actuated AUV** at the reference pose using Homography-based Visual Servoing

$$H = R^T - \frac{1}{d^*} R^T p_C n^{*T}$$

Sensors:

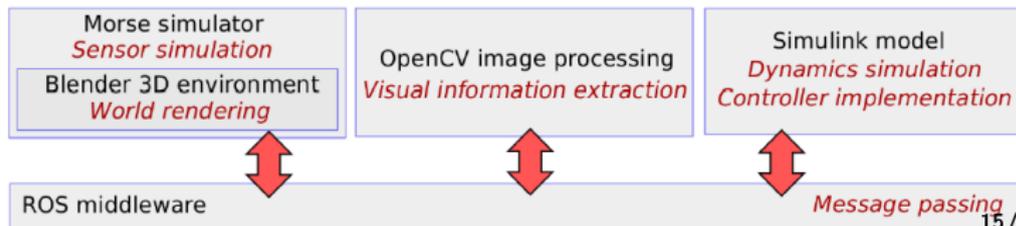
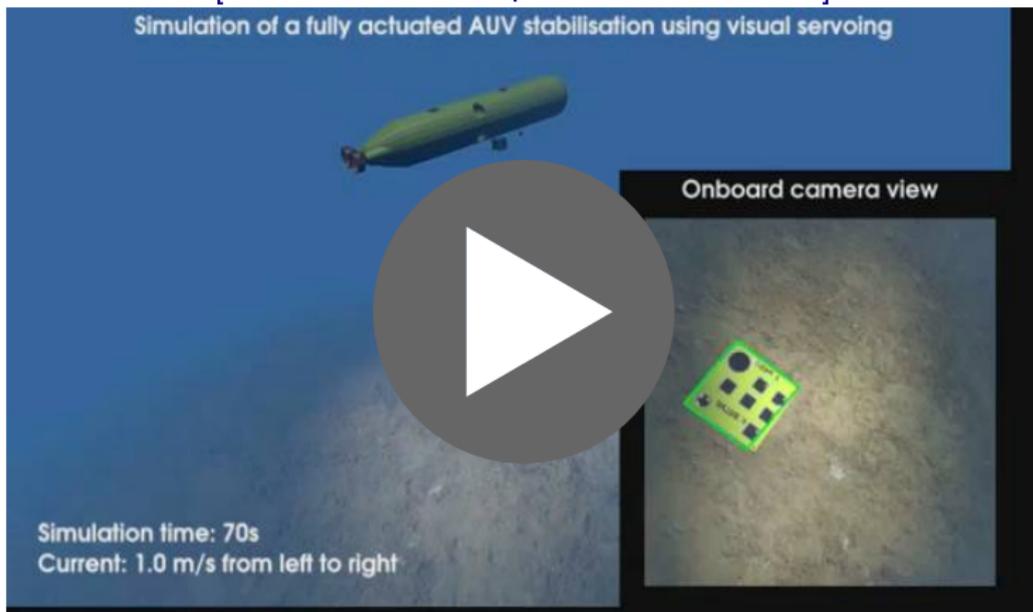
- **Monocular Camera** → Homography H ;
- **DVL** → Linear velocity V ;
- **IMU** → Angular velocity Ω and Gravity direction $R^T e_3$.

Lyapunov-based Nonlinear Control:

- Dealing with complex and **strongly coupled dynamics**;
- **Almost-global** asymptotical stability;
- **Robust** to sea-current and model uncertainties;
- **Generic** for fully-actuated AUVs.

Homography-based Visual Servoing for AUVs (2/2)

[Hua, Allibert, Krupinski, Hamel, 2013]



Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

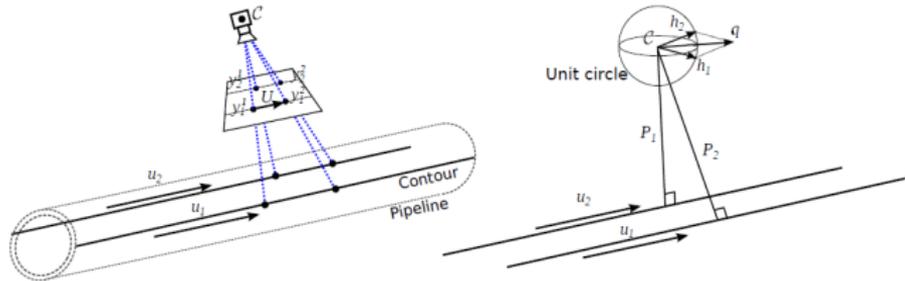
Visual Servo Pipeline-following for AUVs

Introduction

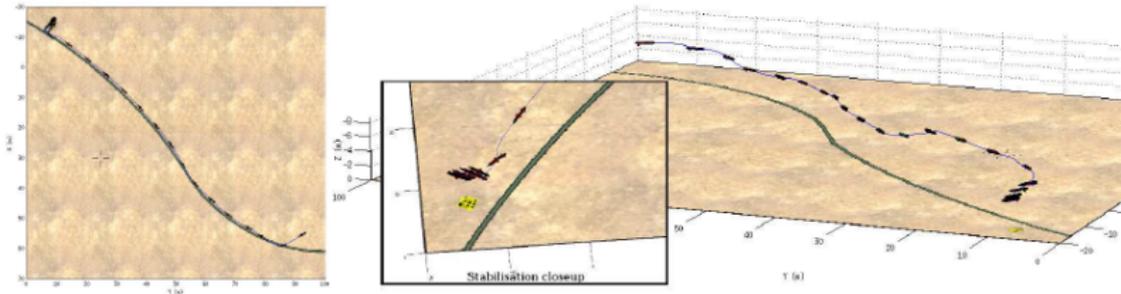
Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires



- **Plucker coordinates** (h_i, U) : $h_i = \frac{y_i^1 \times y_i^2}{|y_i^1 \times y_i^2|}$, $U = \pm \frac{h_1 \times h_2}{|h_1 \times h_2|}$.
- Stabilise $q = h_1 + h_2$ and the forward velocity to some reference values.
- Nonlinear control ensuring large stability domain and enhanced robustness.



[Krupinski, Allibert, Hua, Hamel, ACC'12]

Constatations :

- ✘ **Beaucoup de systèmes physiques évoluent sur les groupes de Lie**
e.g., orientation $SO(3)$, orientation et position $SE(3)$, homographie $SL(3)$
 - Filtrages classiques (e.g., EKF) peu efficaces.
 - Observateurs invariants plus performants en termes de domaine de convergence, robustesse, simplicité d'implémentation pratique.
- ✘ En pratique, **on ne dispose pas de la mesure d'un élément de groupe**
e.g., $SO(3)$.
- ✘ **Disponibilité de mesures sur l'espace homogène**,
e.g., mesures de directions dans S^2 pour estimer l'orientation dans $SO(3)$.

Motivation théorique :

établir une **méthodologie générale pour la synthèse d'observateur**
sur les groupes de Lie linéaires connexes de dimension finie
en exploitant directement **l'espace de mesure (espace homogène)**.

Motivation pratique :

affiner pour des applications robotiques.

Estimation d'attitude – Contexte

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

IMU = Gyro + Accéléro + Magnéto

- Gyro: mesure vitesse angulaire Ω : $\Omega_y = \Omega + b$

- Magnéto: mesure champ magnétique terrestre $m_B = R^T m_I$

- Accéléro: mesure "accélération spécifique" $a_B = R^T (\dot{v} - g e_3)$

Solutions standardes: Utilise Accéléro comme Inclinomètre

$$\Rightarrow \text{Hypothèse (faibles accélérations): } \dot{v} \approx 0 \Rightarrow a_B \approx -g R^T e_3$$

- Mauvaise précision en cas de fortes accélérations.

Modèle

$$\begin{cases} \dot{R} &= R \Omega_x \\ \dot{b} &= 0 \end{cases}$$

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

Hypothèse de faibles accélérations!

$$\begin{cases} \dot{\hat{R}} &= \hat{R} (\Omega_y - \hat{b} + \sigma_R) \times \\ \dot{\hat{b}} &= \sigma_b \\ \sigma_R &:= k_1^s u_B \times \hat{R}^\top u_I + k_2^s \bar{m}_B \times \hat{R}^\top \bar{m}_I \\ \sigma_b &:= -k_I \sigma_R \end{cases}$$

avec $u_B := -a_B/g$, $u_I := e_3$, $\bar{m}_B := m_B/|m_I|$ and $\bar{m}_I := m_I/|m_I|$.

Problèmes de couplages:

- Dynamiques de Tangage/Roulis estimés sont **fortement couplées avec dynamique de Lacet**;
- Estimés de Tangage/Roulis sont **fortement influencés par perturbations magnétiques**;
- Il faut **utiliser des gains très grands** pour garantir une dynamique rapide.

Estimation d'attitude - découplage l'estimé de Tanguage/Roulis des mesures de magnétomètres (1/2)

Introduction

Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires

Hypothèse de faibles accélérations!

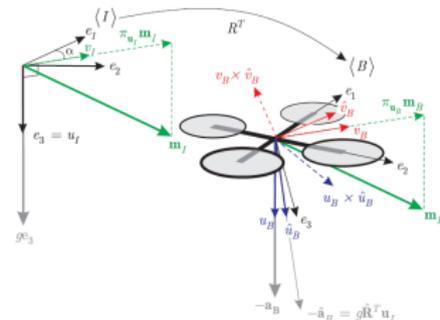
$$\begin{cases} \dot{\hat{R}} &= \hat{R} (\Omega_y - \hat{b} + \sigma_R)_\times \\ \dot{\hat{b}} &= \sigma_b \\ \sigma_R &:= k_1 u_B \times \hat{u}_B + k_2 \hat{u}_B \hat{u}_B^\top (v_B \times \hat{v}_B) \\ \sigma_b &:= -k_3 u_B \times \hat{u}_B - k_4 v_B \times \hat{v}_B \end{cases}$$

où

$$\begin{cases} u_B := -\frac{a_B}{g}, & v_B := \frac{\pi u_B m_B}{|\pi u_I m_I|}, \\ u_I := e_3, & v_I := \frac{\pi u_I m_I}{|\pi u_I m_I|}. \end{cases}$$

avec $\pi_x := |x|^2 I_3 - x x^\top, \forall x \in \mathbb{R}^3$, et

$$\hat{u}_B := \hat{R}^\top u_I, \quad \hat{v}_B := \hat{R}^\top v_I.$$



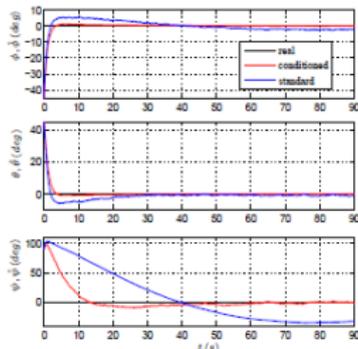
Estimation d'attitude - découplage l'estimé de Tangage/Roulis des mesures de magnétomètres (2/2)

Introduction

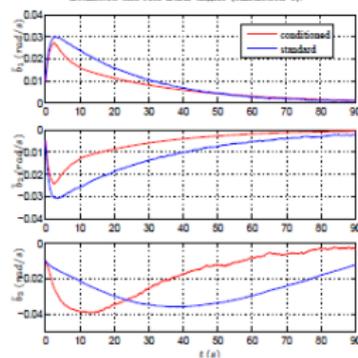
Commande des véhicules sous-actionnés

Commande référencée capteurs

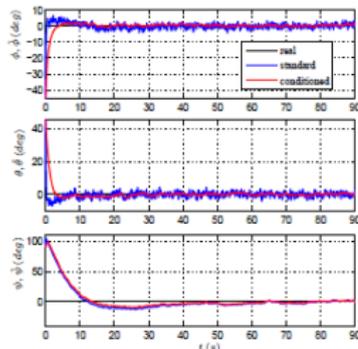
Observateurs Non-linéaires



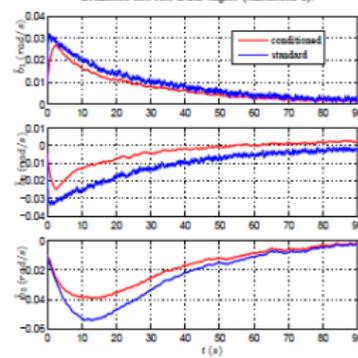
Estimated and real Euler angles (simulation 1).



Gyro-bias error $\tilde{b} = b - \hat{b}$ (simulation 1).



Estimated and real Euler angles (simulation 2).



Gyro-bias error $\tilde{b} = b - \hat{b}$ (simulation 2).

Limitation des méthodes existantes en utilisant une centrale inertielle (IMU):

- Accéléromètre \approx Inclinomètre $\Rightarrow \ddot{x} \approx 0$
- Performance **dégradée** en cas de fortes accélérations

Mes solutions [Hua, CEP'10]:

- Compléter les mesures accélérométriques par **fusion IMU + GPS**
- Exploiter la structure du groupe $SO(3)$;
- Réaliser directement sur l'espace de mesures (ou espace homogène);
 - ▶ **Surmonter le problème de fortes accélérations;**

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnésCommande
référencée
capteursObservateurs
Non-linéaires

Système:

$$\begin{cases} \dot{v} &= g e_3 + R a_B \\ \dot{R} &= R \omega_{\times} \end{cases}$$

Observateur:

$$\begin{cases} \hat{v} = g e_3 + \hat{R} a_B + k_1 (v - \hat{v}) \\ \hat{R} = \hat{R} (\omega + \sigma)_{\times} \\ \sigma = k_2 m_B \times \hat{R}^{\top} m_I + k_3 a_B \times \hat{R}^{\top} (v - \hat{v}) \end{cases} \quad k_{1,2,3} > 0$$

- Hypothèse: sans biais de gyro et d'accéléro.
- Condition suffisante sur k_1 garantissant la convergence exponentielle de (\hat{v}, \hat{R}) à (v, R) , et suggérant de choisir un grand gain k_1 pour un domaine d'attraction large.

Estimation de la vitesse et l'accélération:

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}} &= g + Qa_B + k_1(v - \hat{v}) \\ \dot{\hat{Q}} &= Q\omega_x + k_v(v - \hat{v})a_B^\top \end{cases} \quad k_1, k_v > 0$$

- $Q \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ une matrice virtuelle.
- $\hat{v} \rightarrow v$, $Qa_B \rightarrow Ra_B$, $\hat{v} \rightarrow \dot{v}$ pour toute condition initiale.
- Grand gains ne sont pas nécessaires.

Observateur d'Attitude:

$$\begin{cases} \dot{\hat{R}} = \hat{R}(\omega + \sigma)_\times \\ \sigma = k_2 m_B \times \hat{R}^\top m_I + k_3 a_B \times \hat{R}^\top (Qa_B + k_1(v - \hat{v})) \end{cases}$$

- $R\hat{R}^\top$ converge soit à I_3 soit à $\mathbb{U} = \{R \in \text{SO}(3) \mid \text{tr}(R) = -1\}$

Simulation results

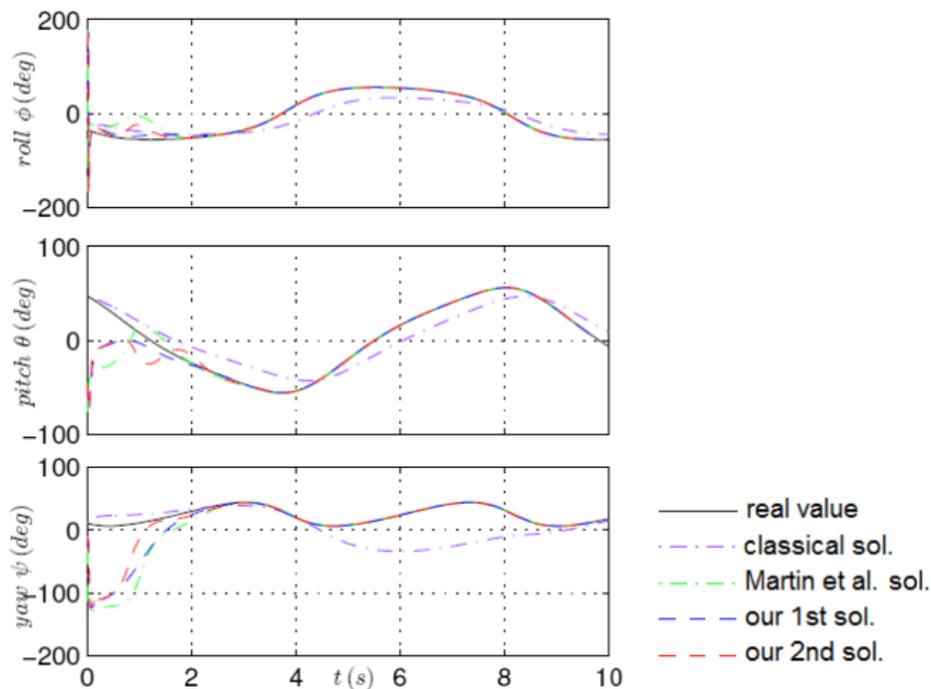
Trajectoire circulaire

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référéncée
capteurs

Observateurs
Non-linéaires



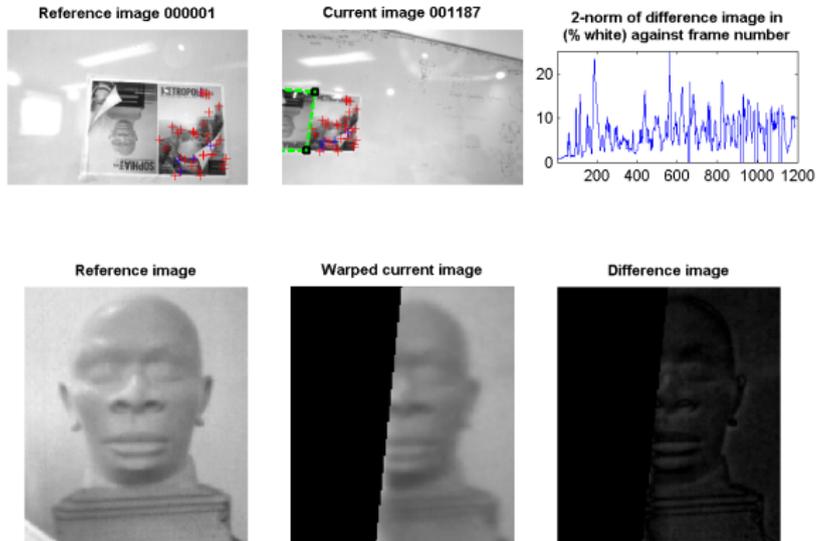
Observateur de l'HOMOGRAPHIE

Introduction

Commande des véhicules sous-actonnés

Commande référencée capteurs

Observateurs Non-linéaires



[Hamel et al, CDC'11]

- Camera + gyro;
- Estimation de l'Homographie à partir des points correspondants:

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Introduction

Commande
des véhicules
sous-actionnés

Commande
référencée
capteurs

**Observateurs
Non-linéaires**