

Navigation coordonnée de cordée de robots sous-marins

MOQESM'2018

Matheus Laranjeira, Claire Dune and Vincent Hugel

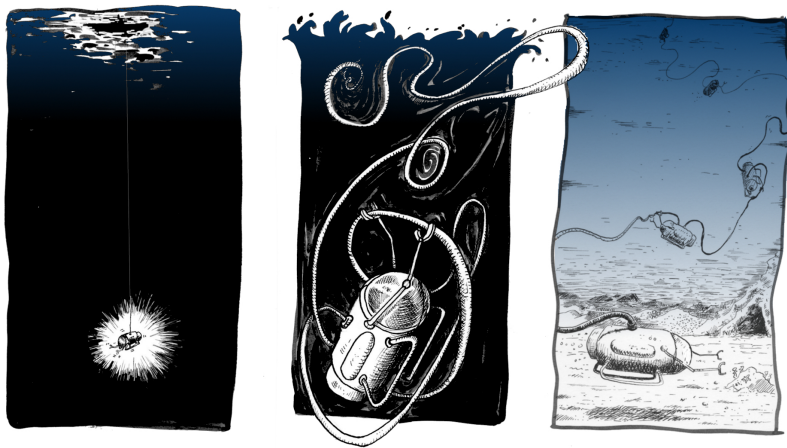
Université de Toulon - COSMER Laboratory EA 7398

8 October 2017

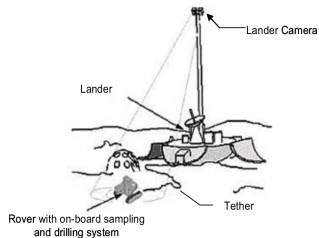


Le concept de cordée de robots

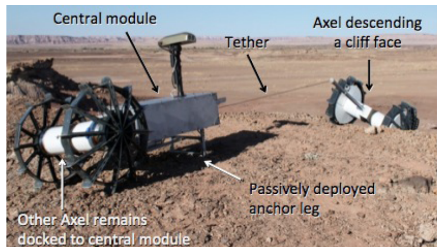
Vers la gestion de l'ombilical en milieu confiné



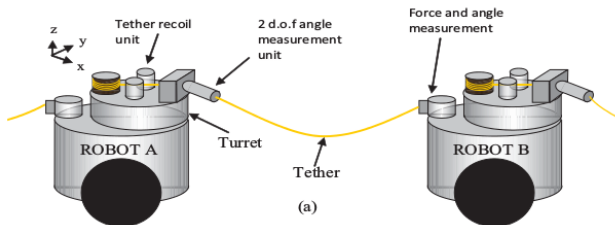
Robots téléopérés à câbles



[Iqbal 2008]

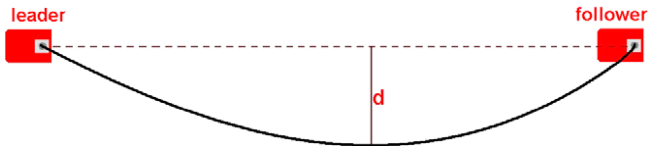


[Tsai 2013]

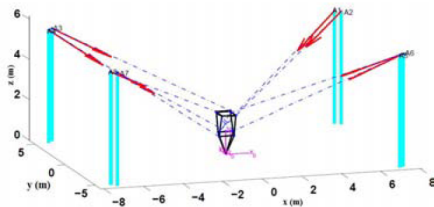


[Rajan 2016]

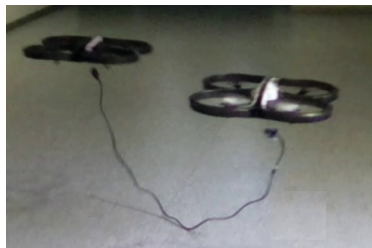
Les modèles de câbles



[Echegoyen 2010]

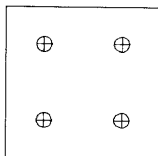


[Dallej 2012]

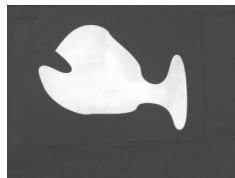


[Estevez 2015]

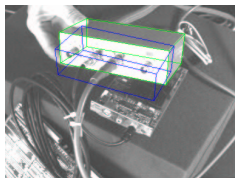
L'asservissement visuel [Chaumette2006,Chaumette2007] vise à contrôler le mouvement du robot grâce à la régulation des caractéristiques visuelles



[Chaumette 1992]



[Tahri 2003]

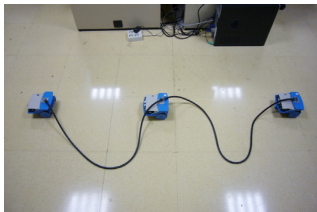


[Comport 2004]

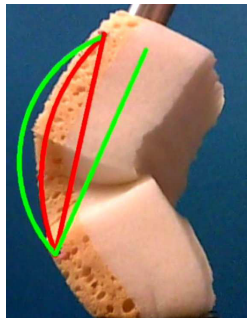


[Comport 2007]

Plus récemment, la vision par ordinateur a été utilisée pour contrôler la forme d'objets déformables

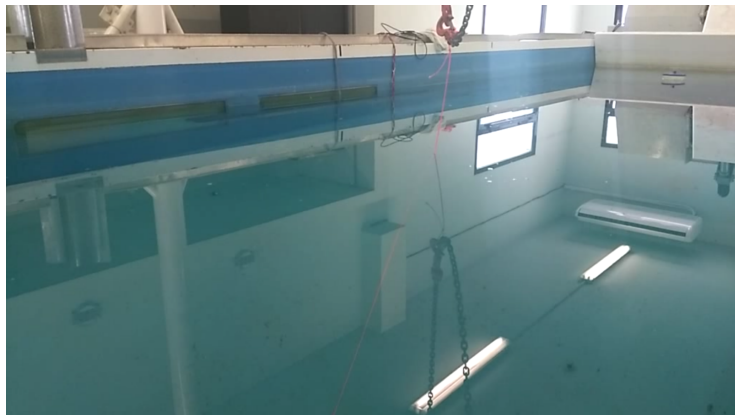


[Echegoyen 2010]



[Navarro 2013]

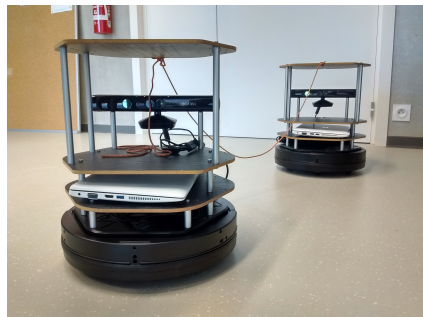
La forme du câble sous l'eau



- Deux robots terrestres de type Turtlebot sont liés par une corde passive
- Le robot de tête se déplace librement tandis que le suiveur maintient l'ombilical à une forme désirée

Objectif

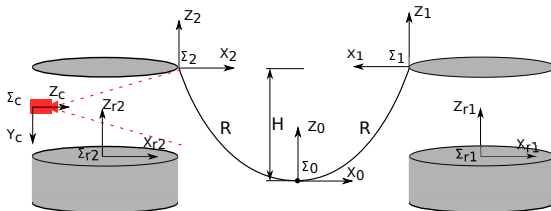
Contrôler la forme de la corde en utilisant un asservissement visuel adapté



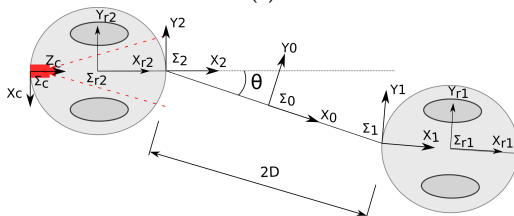
Deux Turtlebots équipées de capteurs RGB-D

Le modèle de la chaîne

La forme 3D de la chaîne dans le repère Σ_0 : $Z = \frac{1}{C} \cosh(CX)$



(a)



(b)

Schéma du montage expérimental : (a) vue de côté et (b) vue de dessus

Les équations de la chaînette

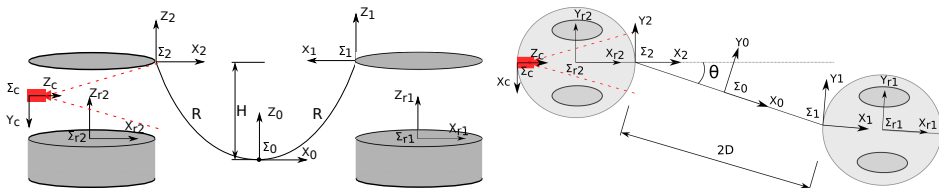
La forme 3D de la chaînette dans le repère de la caméra :

$$\Sigma_c : \begin{cases} Y = -\frac{1}{C} [\cosh(C(\eta - D)) - 1] + H + Y_2 \\ Z = \cot \theta (-X + X_2) + Z_2 \end{cases} \quad (1)$$

avec $\eta = \frac{-X+X_2}{\sin \theta}$, $C = \frac{2H}{R^2-H^2}$, $D = f(R, H)$ et (X_2, Y_2, Z_2) étant les coordonnées de Σ_2 dans le repère Σ_c . L'équation de la chaînette projetée :

$$y(x, H, \theta) = \eta_1 \left[-\frac{1}{C} (\cosh(C(\eta_2 - D)) - 1) + H + Y_2 \right] \quad (2)$$

avec $\eta_1 = \frac{\sin \theta + \cos \theta x}{\cos \theta X_2 + \sin \theta Z_2}$ et $\eta_2 = \frac{X_2 - Z_2 x}{\sin \theta + x \cos \theta}$



Les paramètres de la chaîne

$$\mathbf{s} = (a, b)$$

$$a = \frac{H}{H_{max}} \text{ et } b = \sin(\theta)$$

La relation entre le mouvement du robot et l'évolution des paramètres de la chaîne est donnée par la matrice d'interaction $\mathbf{L}_C$

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_C \mathbf{v}_2 \quad (3)$$

où

$$\mathbf{L}_C = \begin{bmatrix} -\frac{K_H \sqrt{1-b^2}}{2H_{max}} & -\frac{K_H b}{2H_{max}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_H (Y_1 \sqrt{1-b^2} - X_1 b)}{2D} \\ -\frac{b \sqrt{1-b^2}}{2D} & \frac{-1+b^2}{2D} & 0 & 0 & 0 & -\frac{Y_1 b \sqrt{1-b^2} + X_1 (1-b^2)}{2D} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{v}_2$ est la vitesse du point d'attache de la chaîne sur le robot suiveur,
 $K_H = f(H)$ et (X_1, Y_1, Z_1) sont les coordonnées de Σ_1 dans Σ_c

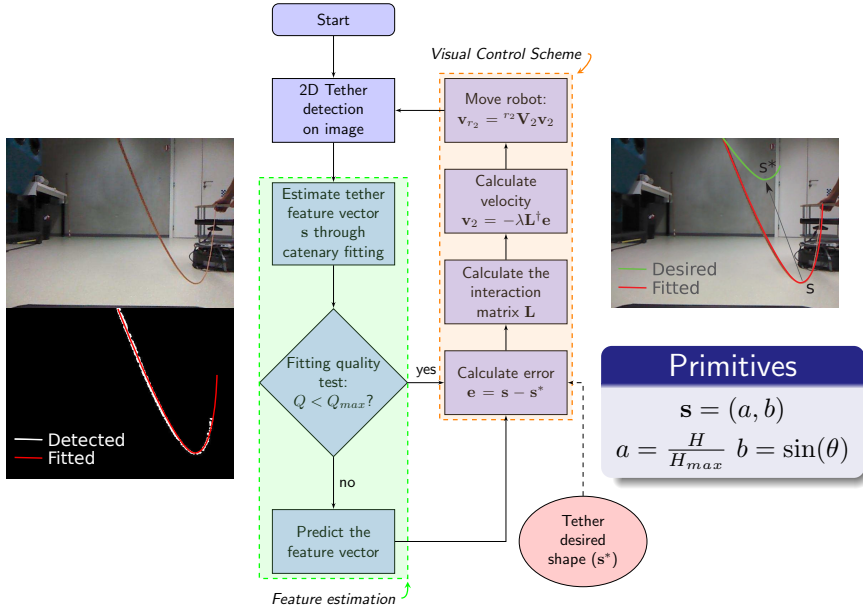
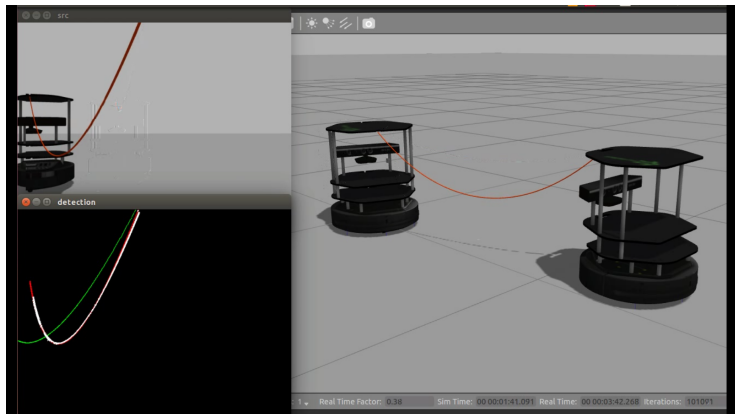
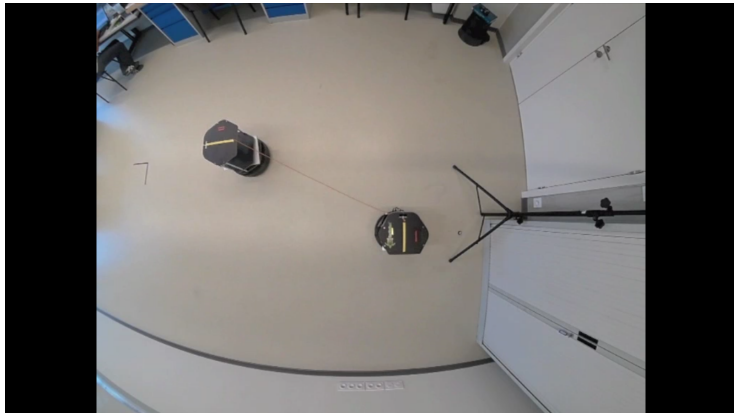


Schéma d'asservissement visuel basé chaîne pour des robots à ombilicaux

Validation en simulation

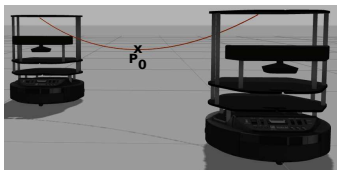


Validation expérimentale

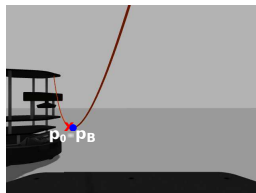
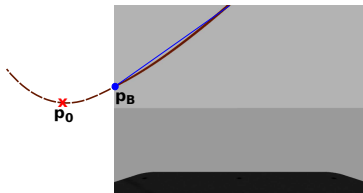


Estimation des paramètres

Heuristique de calcul des paramètres initiaux



P_0 : point 3D le plus bas de la chaîne



p_0 : projection de P_0 dans l'image
 p_B : le point le plus bas dans l'image
Approximation : $p_B \approx p_0$

Estimation des paramètres

Heuristique de calcul des paramètres initiaux

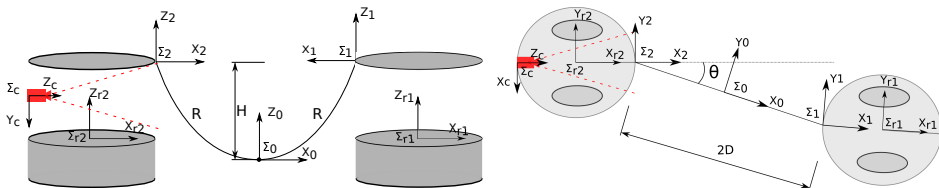
La forme 3D de la chaîne dans le repère de la caméra :

$$\Sigma_c : \begin{cases} Y = -\frac{1}{C} [\cosh(C(\eta - D)) - 1] + H + Y_2 \\ Z = \cot \theta (-X + X_2) + Z_2 \end{cases} \quad (4)$$

avec $\eta = \frac{-X+X_2}{\sin \theta}$, $C = \frac{2H}{R^2-H^2}$, $D = f(R, H)$ et (X_2, Y_2, Z_2) étant les coordonnées de Σ_2 dans le repère Σ_c . L'équation de la chaîne projetée :

$$y(x, H, \theta) = \eta_1 \left[-\frac{1}{C} (\cosh(C(\eta_2 - D)) - 1) + H + Y_2 \right] \quad (5)$$

avec $\eta_1 = \frac{\sin \theta + \cos \theta x}{\cos \theta X_2 + \sin \theta Z_2}$ et $\eta_2 = \frac{X_2 - Z_2 x}{\sin \theta + x \cos \theta}$



Estimation des paramètres

Heuristique de calcul des paramètres initiaux

En évaluant Eq. (5) en $\mathbf{p}_0 \approx \mathbf{p}_B = (x_B, y_B)$ on obtient

$$\Sigma_c : \begin{cases} \hat{D} = \frac{X_2 - Z_2 x_B}{\sin \hat{\theta} + x_B \cos \hat{\theta}} \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} \hat{H} = y_B \frac{\cos \hat{\theta} X_2 + \sin \hat{\theta} Z_2}{\sin \hat{\theta} + x_B \cos \hat{\theta}} - Y_2 \end{cases} \quad (6b)$$

Le rapport entre D et H est obtenu en évaluant Eq. (4) au centre de Σ_1 :

$$\hat{H} = \frac{1}{\hat{C}} \left[\cosh(\hat{C} \hat{D}) - 1 \right] \quad (7)$$

Écrivons $\hat{D} = \frac{G_1}{G_3}$ et $\hat{H} = \frac{G_2}{G_3}$. Introduire Eqs. (6) dans (7) entraîne:

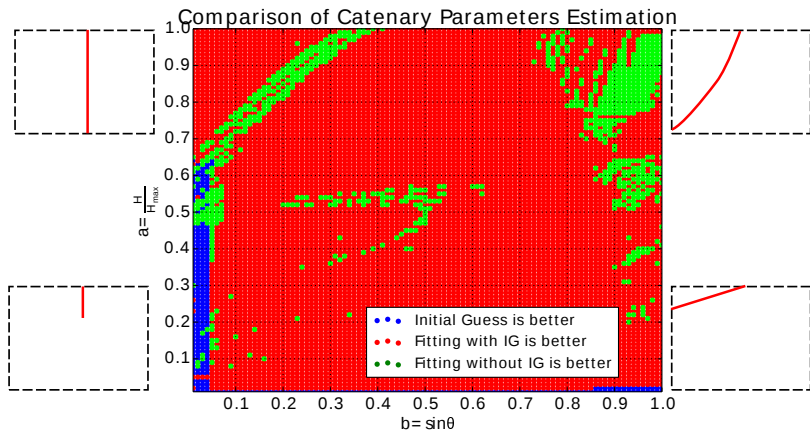
$$g(\hat{\theta}) = \frac{2G_2^2}{R^2 G_3^2 - G_2^2} - \cosh\left(\frac{2G_1 G_2}{R^2 G_3^2 - G_2^2}\right) + 1 \quad (8)$$

La racine $g(\theta) = 0$ est trouvée par dichotomie ¹

$G_1 = X_2 - Z_2 x_B$, $G_2 = y_B (\cos \hat{\theta} X_2 + \sin \hat{\theta} Z_2) - Y_2 G_3$ et $G_3 = \sin \hat{\theta} + x_B \cos \hat{\theta}$ ▶

Estimation des paramètres

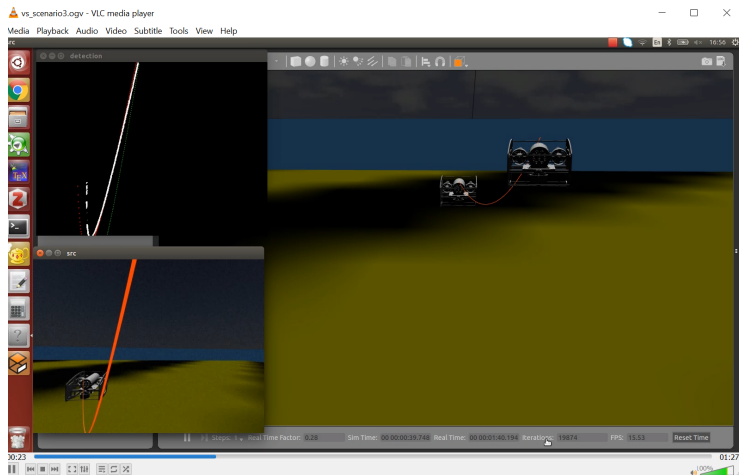
Résultats



en bleu : meilleure estimation avec l'heuristique sans fitting
en rouge : meilleure estimation avec l'heuristique et fitting
en vert : meilleure estimation avec fitting et initialisation à (0,5, 0,5)

Simulation Gazebo UUV

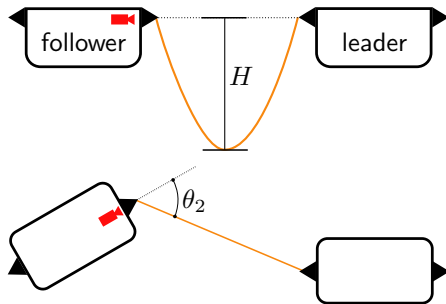
Asservissement visuel 3D d'une paire de rovs



Commande d'une paire de ROVs

Un asservissement visuel pour les objets déformables paramétrables par une **chaînette**

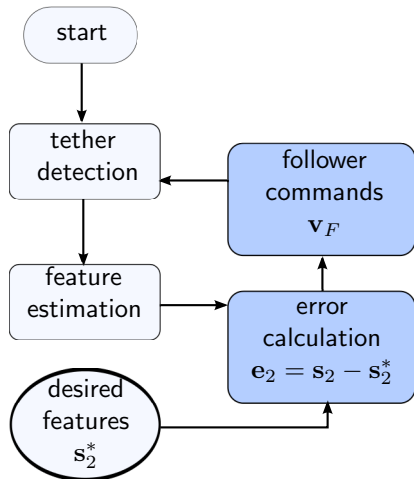
- Contrôler la forme de l'ombilical en déplaçant le point d'attache côté suiveur
- Depuis la caméra embarquée du suiveur



Vue du robot suiveur

$$\mathbf{s}_2 = \left[\frac{H}{H_{max}}, \sin(\theta_2) \right]^T$$

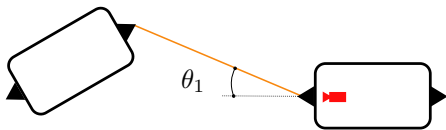
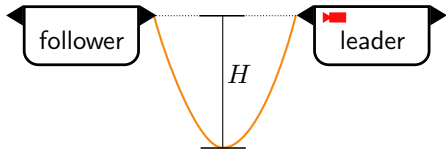
$$\mathbf{v}_F = -\lambda_2 \mathbf{L}_2^+(\mathbf{e}_2)$$



Commande d'une paire de ROVs

Un asservissement visuel pour les objets déformables paramétrables par une **chainette**

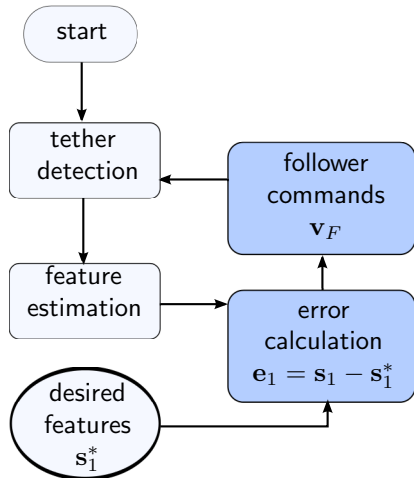
- Contrôler la forme de l'ombilical en déplaçant le point d'attache côté suiveur
- Depuis la caméra embarquée du leader



Vue du leader

$$\mathbf{s}_1 = \left[\frac{H}{H_{max}}, \sin(\theta_1) \right]^T$$

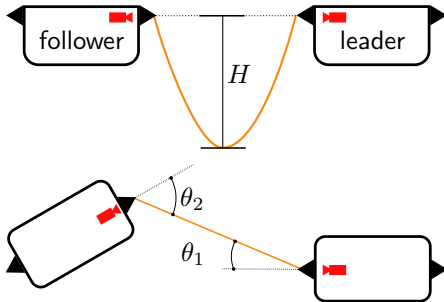
$$\mathbf{v}_F = \lambda_1^2 \mathbf{V}_1 \mathbf{L}_1^+(\mathbf{e}_1)$$



Control of a pair of ROVs

A **visual servoing** scheme for **catenary shaped deformable** objects

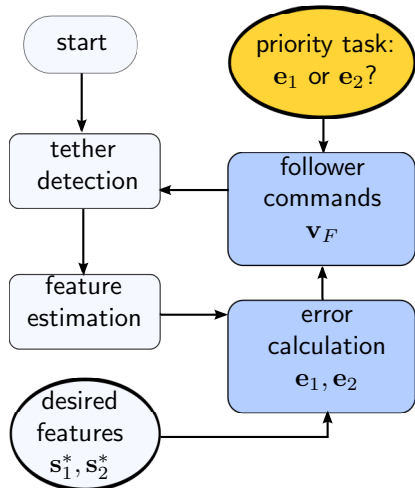
- Contrôler la forme de l'ombilical en déplaçant le point d'attache côté suiveur
- En utilisant les deux points de vue hiérarchisés.



Control hiérarchique

$$\mathbf{v}_F = -\lambda_2 \mathbf{L}_2^+ \mathbf{e}_2 + \mathbf{P}_2 (\lambda_1^2 \mathbf{V}_1 \mathbf{L}_1^+ \mathbf{e}_1)$$

where $\mathbf{P}_2 = \mathbf{I} - \mathbf{L}_2^+ \mathbf{L}_2$



- Priorité aux features du robot suiveur (rotation):

$$\mathbf{v}_2^{FL} = -\lambda_2 L_2^+ \mathbf{e}_2 + \lambda_1 \mathbf{P}_2^2 \mathbf{V}_1 L_1^+ \mathbf{e}_1 \quad (9)$$

où $\mathbf{P}_2 = I - L_2^+ L_2$ est le projecteur dans le noyau de L_2 .

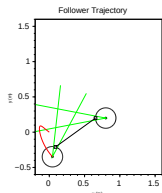
- Priorité aux features du robot leader (translation) :

$$\mathbf{v}_2^{LF} = \lambda_1^2 \mathbf{V}_1 L_1^+ \mathbf{e}_1 - \lambda_2^2 \mathbf{V}_1 \mathbf{P}_1^1 \mathbf{V}_2 L_2^+ \mathbf{e}_2 \quad (10)$$

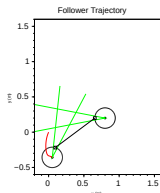
où $\mathbf{P}_1 = I - L_1^+ L_1$ est le projecteur dans le noyau de L_1

Comparaison des priorités

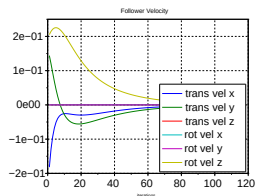
Comportements typiques



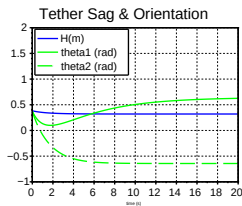
(a) Priorité au suiveur



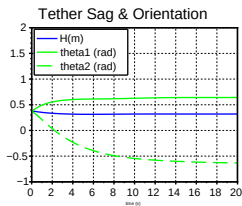
(b) Priorité au leader



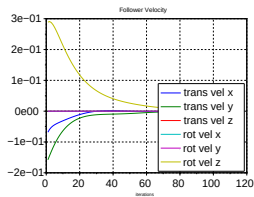
(c) Priorité au suiveur



(d) Priorité au suiveur



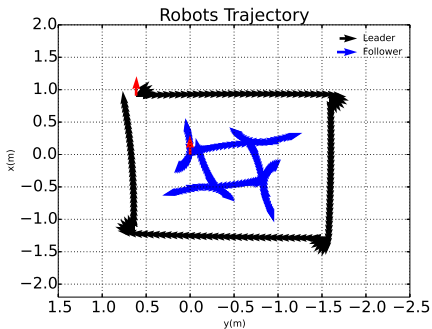
(e) Priorité au leader



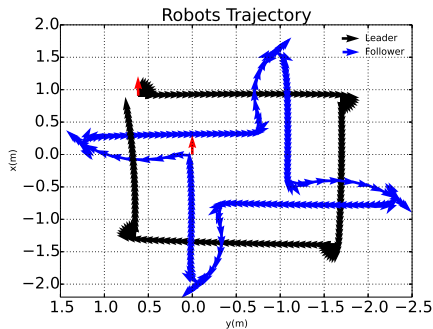
(f) Priorité au leader

Comparaison des controleurs

Comportements typiques



Priorité aux features suiveur



Priorité aux features leader

Position de départ : leader : ($X = 0.90m, Y = 0.61m, \theta = 0^\circ$)
 suiveur : ($X = 0m, Y = 0m, \theta = 0^\circ$)

- Estimation des paramètres de la chaîne améliorée dans la plage $\theta \in [-15^\circ, 15^\circ]$ avec nouvelle heuristique d'initialisation
- Proposition d'un schéma de commande à deux tâches pour contraindre tous les DDL du système
- Généralisation de la loi de contrôle à 6 DDL pour un robot sous-marin.
- Validation par simulations et expérimentations dans une piscine en cours.

