Commande d'un robot patineur par biomimétisme

Luc Jaulin, ENSIETA, Brest

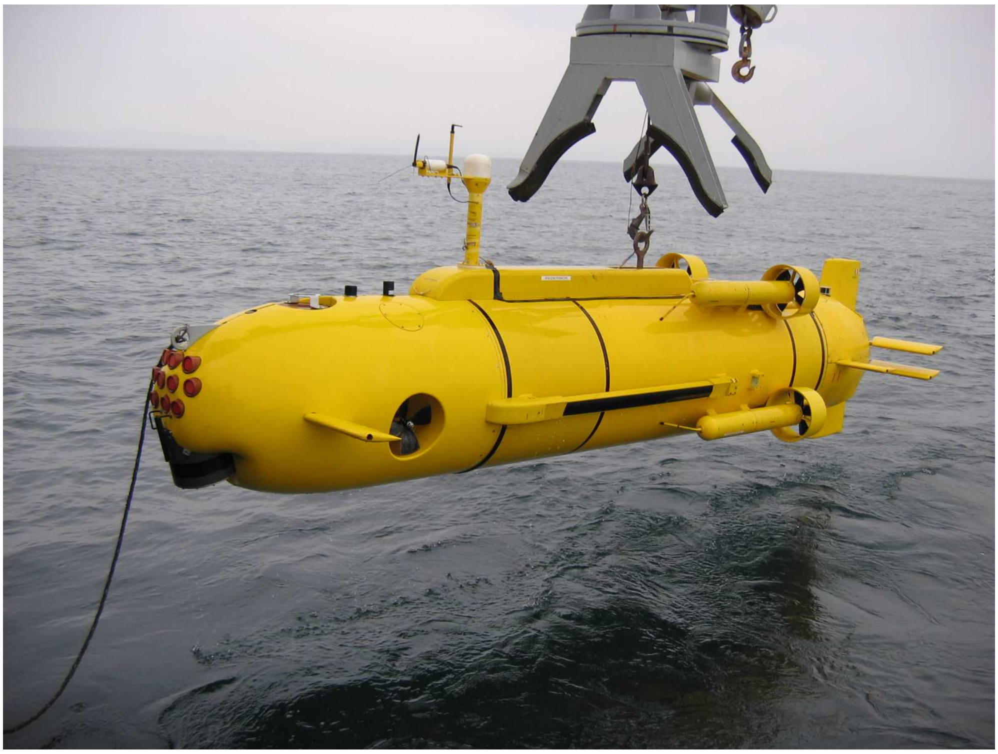
www.ensieta.fr/jaulin/

Nancy, 3 juin 2010

1 Motivation

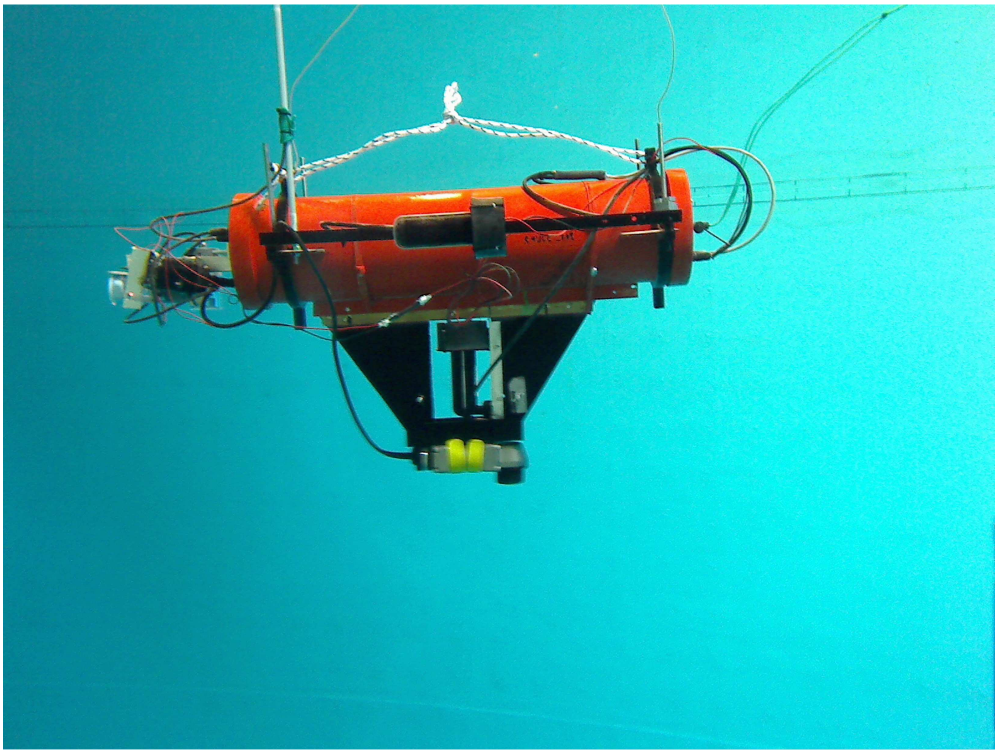
Les robots sous-marins sont peu discrets (bruit d'hélice) et ne peuvent atteindre des vitesses élevées (cavitation).

Mais il sont faciles à commander par les techniques classiques.



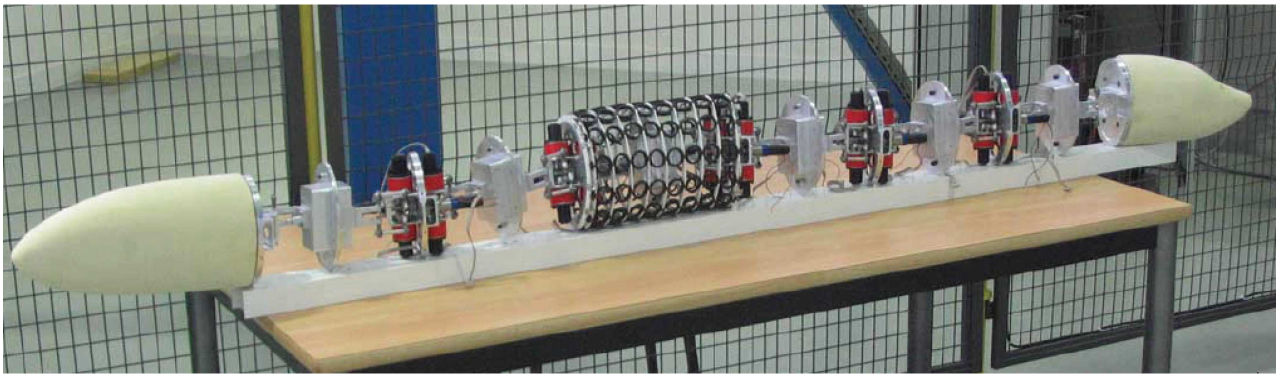
The *Redermor*, GESMA


A785



Robot SAUC'ISSE (ENSIETA)

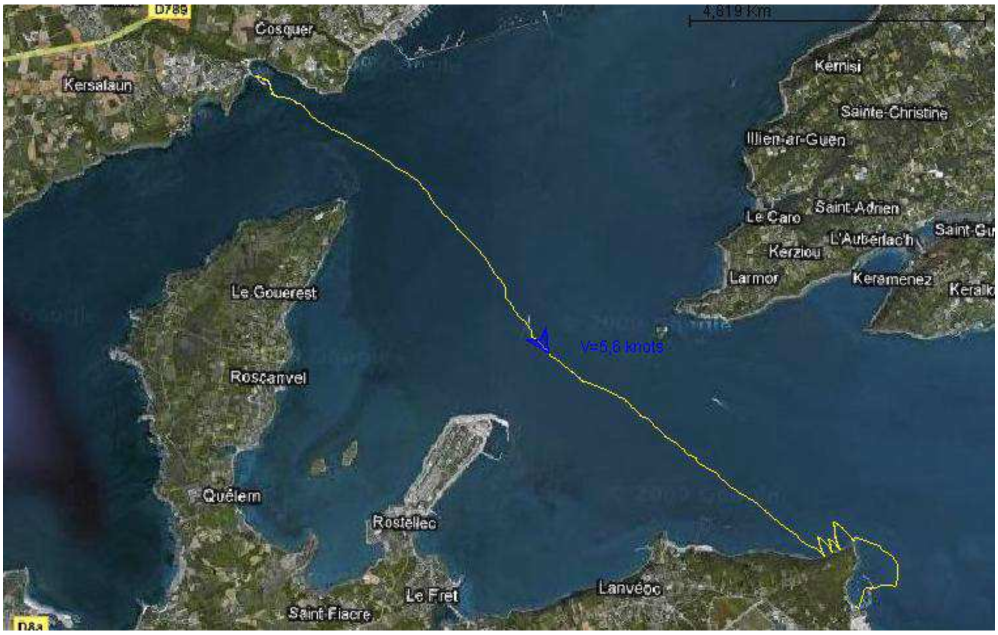
Un robot sous-marin de type anguille peut être discret et rapide. Mais ses équations sont complexes et fortement non-linéaires.



Robot Anguille de l'IRCCyN

Il existe des robots complexes que l'ont sait relativement bien commander si on a une bonne intuition de la dynamique du système.


BREIZH
SPIRIT
ENSIETA


4,819 Km
D789
Cosquer
Kersalaun
Kernisi
Sainte-Christine
Illien-ar-Guen
Saint-Adrien
Le Caro
L'Auberlac'h
Kerziou
Larmor
Keramenez
Le Gouerest
V=5,6 knots
Roscanvel
Quélern
Rostellec
Le Fret
Lanvéoc
Saint-Fiacre
D8a

Voilier autonome. La rade avant la transatlantique

Avant le grand bain, il y a le petit. Le voilier miniature autonome concocté à l'Ensieta a traversé avec succès la rade, en début de semaine. L'idée : réussir un jour une transatlantique.

Une partie de l'équipe : Kostia Poncin, Richard Leloup, Luc Jaulin, Bruno Auzier et Jan Sliwka. Manque Pierre-Henri Reilhac.

Lundi, Breizh-Spirit – c'est son nom – est parti de Saint-Anne-du-Portzic et a rejoint Lanvéoc, soit 12 km en deux heures environ. Il était tout seul, autonome, accompagné à distance, sur un semi-rigide, de ses « parents », une petite équipe d'étudiants et d'enseignants de l'Ensieta. Une traversée réalisée en collaboration avec l'École navale.

De beaucoup, Breizh-Spirit est sans doute resté inaperçu. Il ne fait qu'1,30 m de long pour 10 kg. Mais il a avancé vaillamment, à 3,1 nœuds de moyenne, au près, ce qui n'était pas la configuration idéale. En pointe, il a atteint 5,5 nœuds.

Premier test à la mer près de Porto

L'idée a pris corps en 2005. Luc Jaulin, professeur en automatique-robotique à l'Ensieta, était alors président du jury, à Toulouse, de la première Microtransat. L'objectif, pour une traversée de l'Atlantique, a été fixé à 2010.

Breiz-Spirit a lui-même mûri l'année passée. Richard Leloup, alors en première année, se souvient avoir fabriqué la coque durant les vacances de Noël. D'autres ont apporté leur pierre en électronique, informatique, mécanique, robotique et architecture navale, des compétences qui existent à l'école et que des projets, tels que Breiz-Spirit, permettent de mixer autour d'un objectif à atteindre.

Cet été, le mini-voilier a participé, près de Porto, à la « World robotic sailing championship », premier test à la mer pour lui ; l'occasion aussi de se comparer. Onze bateaux, fort divers, étaient au rendez-vous. Il y avait là aussi des Anglais, des Suisses, des Portugais et des Américains.

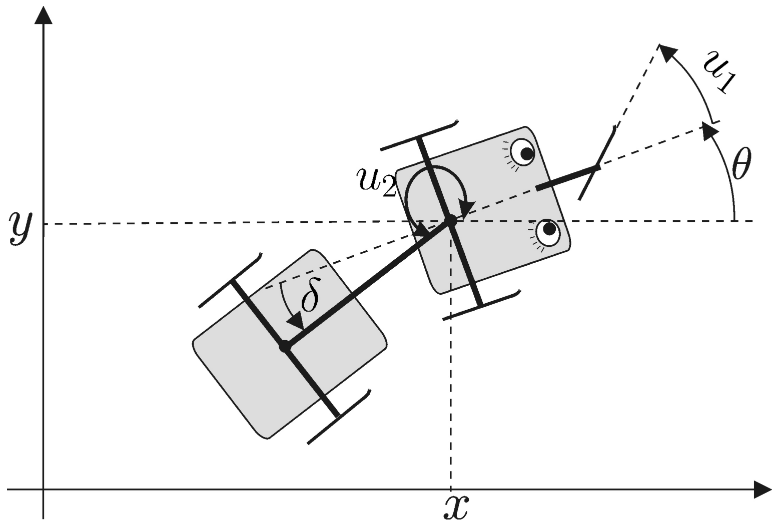
Une compétition en septembre 2010

L'équipe de l'Ensieta a en ligne de mire 2010 avec une compétition, en juin, probablement au Canada. Le départ de la fameuse transatlantique pourrait avoir lieu, en septembre, depuis l'Irlande. La traversée risque alors de durer cinq mois...

Pour l'heure, l'équipe de Breizh-Spirit va travailler à améliorer le mini-voilier, rendre plus robuste l'électronique, le gréement et les voiles. Étanchéifier la coque, implanter des panneaux solaires, se passer de la girouette sont aussi au programme. Il est prévu que les bateaux puissent communiquer chaque jour leur position à terre. Normalement, aucun voilier de cette future transat en autonomie ne doit dépasser les 4 m, des « Petits Poucet » comparés aux porte-conteneurs géants...

2 Robot patineur

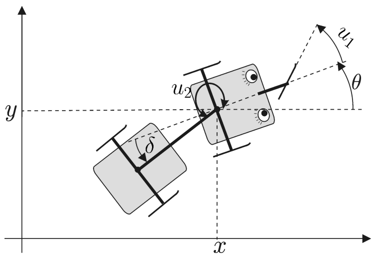
Robot articulé, composé de 5 roues non motorisées



Variables d'état : $\mathbf{x} = (x, y, \theta, v, \delta)$.

Entrées : $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$.

Equations d'état



$$\left\{\begin{array}{lll}\dot{x} & = & v\cos\theta \\ \dot{y} & = & v\sin\theta \\ \dot{\theta} & = & v.u_1 \\ \dot{v} & = & -\left(u_1+\sin\delta\right)u_2-v \\ \dot{\delta} & = & -v\left(u_1+\sin\delta\right)\end{array}\right.$$

On cherche à commander le robot en cap et en vitesse.

3 Commande sinusoïdale

On créé une ondulation

$$u_1 = p_1 \cos(p_2 t) + p_3,$$

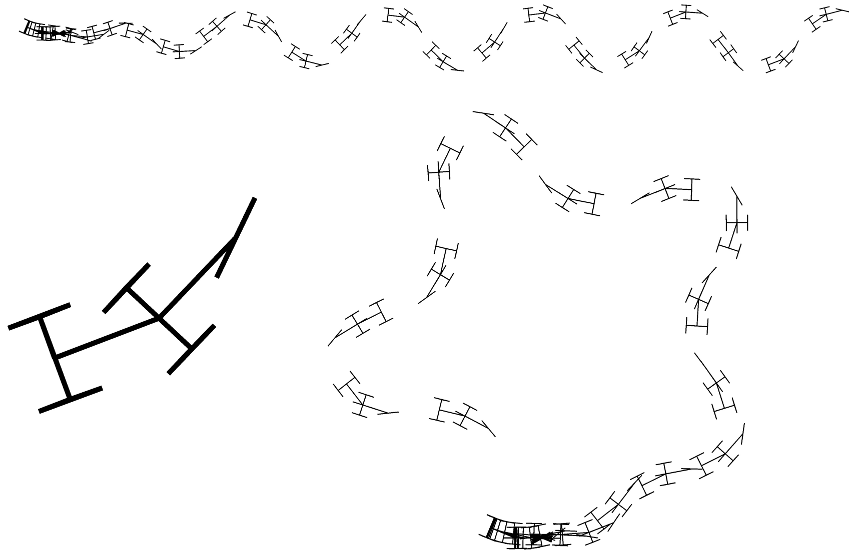
puis, on choisit u_2 pour avoir un couple moteur, c'est-à-dire $\dot{\delta} u_2 \geq 0$.

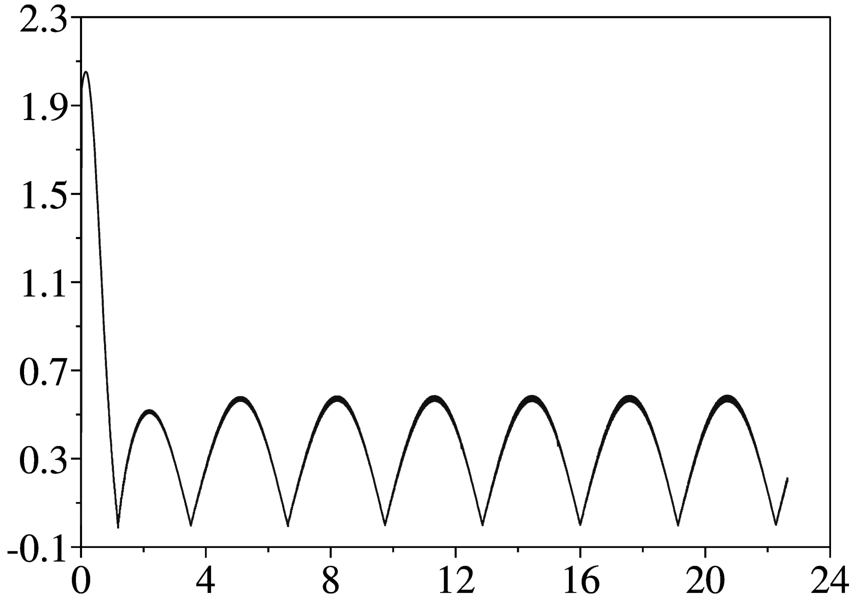
Si $u_2 \in [-p_4, p_4]$, on choisira

$$u_2 = p_4 \mathrm{sign}\left(\dot{\delta}\right).$$

La commande par retour d'état choisie est donc

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} p_1 \cos(p_2 t) + p_3 \\ p_4 \mathrm{sign}\left(-v\left(u_1 + \sin\delta\right)\right) \end{pmatrix}.$$





Poussée fournie par le moteur u_2

4 Commande à poussée constante

On veut avoir, pour tout t, une poussée $\bar{p}$ et un couple $\pm\bar{u}_2$. Ainsi

$$\underbrace{-v\left(u_1+\sin\delta\right)}_{\dot{\delta}}.\underbrace{\varepsilon\bar{u}_2}_{u_2}=\bar{p}, \text{ avec } \varepsilon=\pm 1.$$

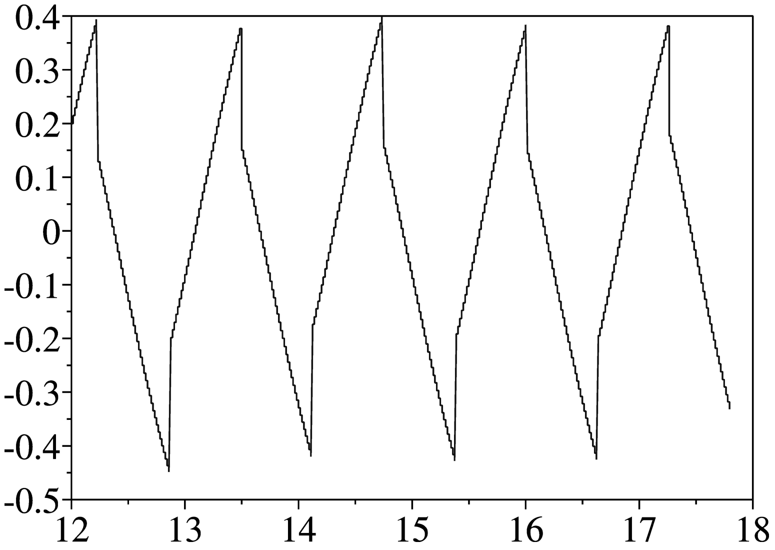
D'où

$$u_1=-\left(\varepsilon.\frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2}+\sin\delta\right).$$

La commande est donc donnée par

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} -\left(\varepsilon . \frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2} + \sin\delta\right) \\ \varepsilon \bar{u}_2 \end{pmatrix}.$$

On choisit ε de type créneau ± 1. Son rapport cyclique $\bar{\varepsilon}$ permet de régler la direction.



Evolution de l'angle de la roue avant en régime de croisière

5 Cas d'une pulsation infinie

Nous avons

$$\left\{\begin{array}{lcc} \dot{x} & = & v\cos\theta \\ \dot{y} & = & v\sin\theta \\ \dot{\theta} & = & v.u_1 \\ \dot{v} & = & -\left(u_1+\sin\delta\right)u_2 - v \\ \dot{\delta} & = & -v\left(u_1+\sin\delta\right) \end{array}\right.$$

avec

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} -\left(\varepsilon.\frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2}+\sin\delta\right) \\ \varepsilon\bar{u}_2 \end{pmatrix}.$$

Le système bouclé s'écrit

$$\left\{\begin{array}{lcl}\dot{x} & = & v\cos\theta \\ \dot{y} & = & v\sin\theta \\ \dot{\theta} & = & -\varepsilon.\frac{\bar{p}}{\bar{u}_2} - v\sin\delta \qquad \longleftarrow \\ \dot{v} & = & \frac{\bar{p}}{v} - v \\ \dot{\delta} & = & \varepsilon.\frac{\bar{p}}{\bar{u}_2}\end{array}\right.$$

Pour avoir une vitesse de rotation de

$$\omega = -\varepsilon.\frac{\bar{p}}{\bar{u}_2} - v \sin \delta$$

il nous faut un rapport cyclique de

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{\bar{u}_2}{\bar{p}} \left(\omega + v \sin \delta\right).$$

Les équations d'état deviennent

$$\left\{\begin{array}{rcl} \dot{x} & = & v\cos\theta \\ \dot{y} & = & v\sin\theta \\ \dot{\theta} & = & \omega \\ \dot{v} & = & \frac{\bar{p}}{v} - v \qquad\qquad \leftarrow \\ \dot{\delta} & = & -\omega - v\sin\delta \end{array}\right.$$

où les entrées sont ω et $\bar{p}$.

Remarque : $\bar{u}_2$ a disparu des équations.

Choisissons.

$$\bar{p} = v\left(a + v\right)$$

où a est une nouvelle entrée. On a

$$\dot{v} = \frac{\bar{p}}{v} - v = \frac{v\left(a + v\right)}{v} - v = a.$$

Les équations d'état deviennent

$$\left\{\begin{array}{rcl} \dot{x} & = & v\cos\theta \\ \dot{y} & = & v\sin\theta \\ \dot{\theta} & = & \omega \\ \dot{v} & = & a \end{array}\right.$$

dont les entrées sont (ω, a). On a un modèle char que l'on sait commander.

Récapitulatif. La commande possède pour consigne (ω, a). Elle donnée

$$\begin{array}{rcl}
\bar{p} & = & v\,(a+v)\,; \\
\bar{\varepsilon} & = & -\dfrac{\bar{u}_2}{\bar{p}}\,(\omega + v\sin\delta)\,. \\
\varepsilon & : & \text{créneau de rapport cyclique } \bar{\varepsilon} \text{ et de fréquence } \infty; \\
\mathbf{u} & = & \begin{pmatrix} -\varepsilon.\frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2} - \sin\delta \\ \varepsilon\bar{u}_2 \end{pmatrix}.
\end{array}$$