

Asservissement référencé capteurs d'une cordée de robots sous-marins autonomes

Le 21 juin 2016

Matheus Laranjeira

Directeur de thèse : Vincent Hugel

Encadrante : Claire Dune

Systèmes à ombilic

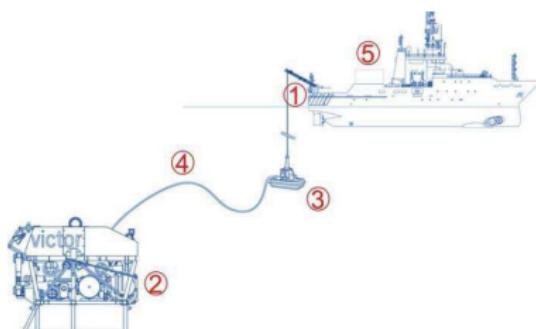
Typiquement utilisés par robots sous-marins télé-opérés en missions de longue durée

Les avantages de la laisse :

- Échange de données
- Autonomie énergétique
- Missions plus longues

Les désavantages de la laisse :

- Perte de manœuvrabilité
- Exploitation difficile d'espaces confinés



Systèmes à ombilic

Typiquement utilisés par robots sous-marins télé-opérés en missions de longue durée

Les avantages de la laisse :

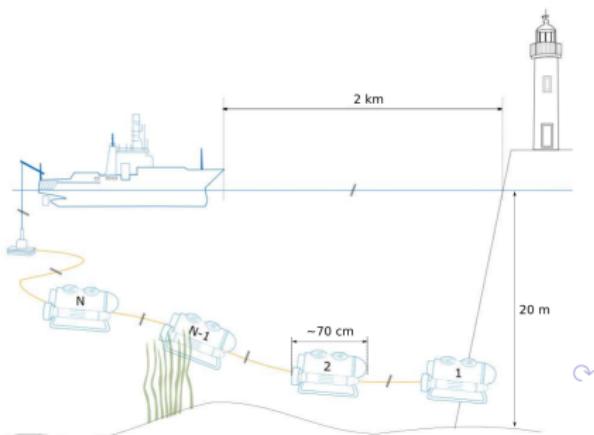
- Échange de données
- Autonomie énergétique
- Missions plus longues

Cordée de robots

- Couverture de zone plus étendue
- Perception distribuée
- Stabilisation

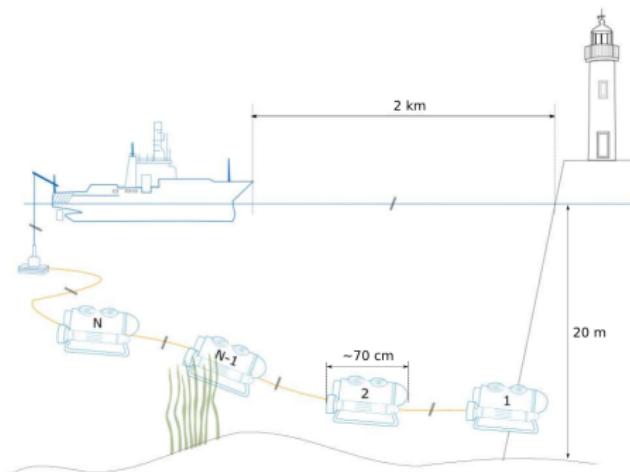
Les désavantages de la laisse :

- Perte de manœuvrabilité
- Exploitation difficile d'espaces confinés



Asservissement référencé capteur d'une cordée de robots sous-marins autonomes

- Surveillance des zones côtières, ports et chenaux
- Eaux peu profondes – Petits robots
- Navigation coordonnée
- Stabilisation de la laisse



Conséquences attendues sur le plan scientifique

- Repérage d'amers dans l'environnement
- Fusion de données proprio- et extéroceptives
- Système de navigation coordonnée
- Capacité d'auto-organisation des robots au sein de la cordée
- Remplir des missions de surveillance et de reconnaissance de zones côtières en mode quasi-autonome

Conséquences attendues sur le plan scientifique

- **Repérage d'amers dans l'environnement**
- Fusion de données proprio- et extéroceptives
- **Système de navigation coordonnée**
- Capacité d'auto-organisation des robots au sein de la cordée
- Remplir des missions de surveillance et de reconnaissance de zones côtières en mode quasi-autonome

Ocean Systems Laboratory

- Systèmes autonomes : planification de trajectoire, évitement d'obstacles et asservissement visuel pour robots sous-marins
- Modélisation et analyse de capteurs : algorithmes de fusion d'information et de détection basé modèle



Edimbourg, Ecosse - UK

Ocean Systems Laboratory



Piscine d'essais

Ocean Systems Laboratory



Piscine d'essais



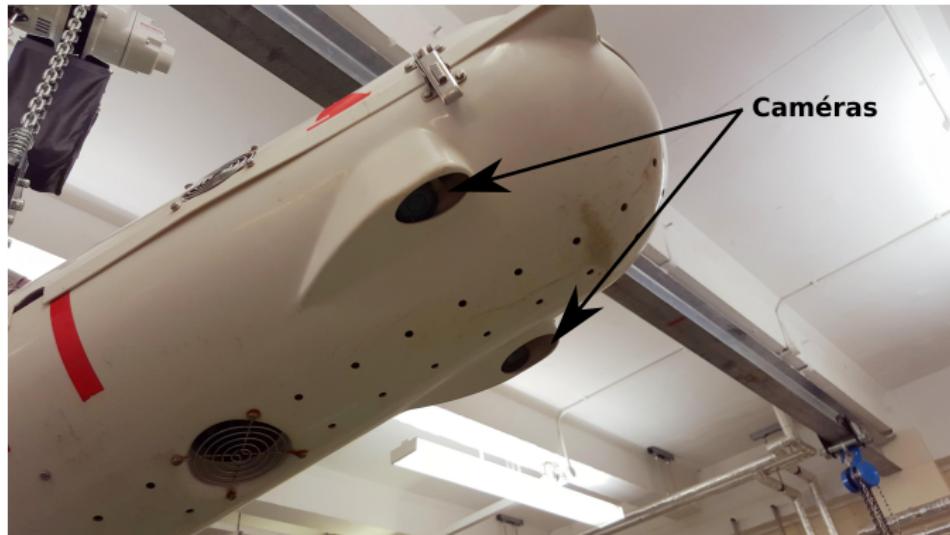
Nessie, un robot sous-marin autonome

Ocean System Laboratory

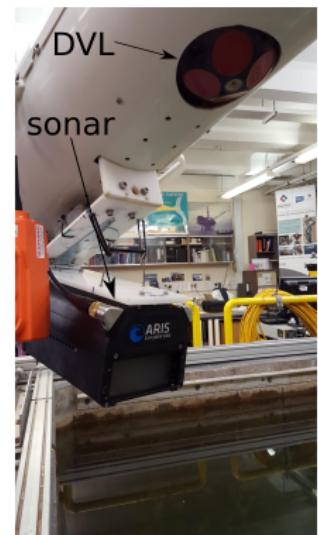
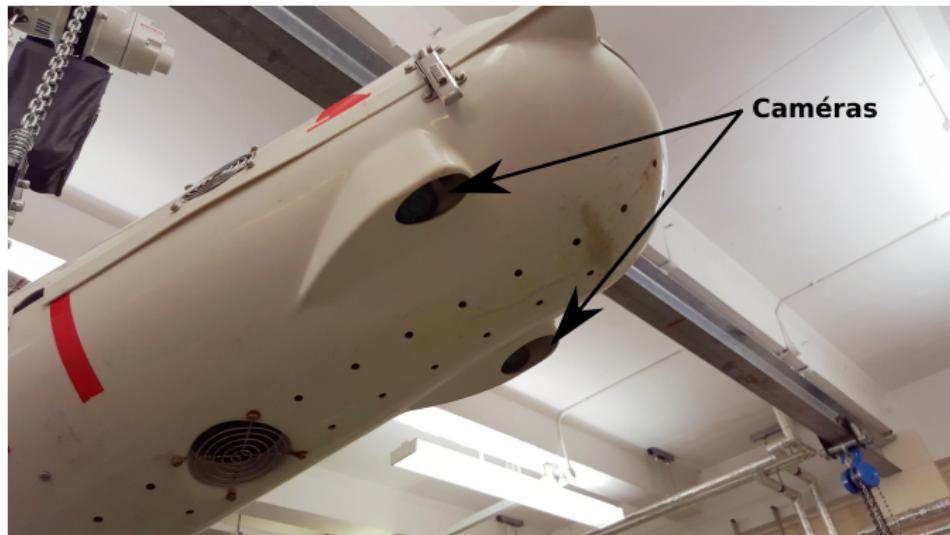


5 DDL (degrés de liberté), charge utile variable

Ocean System Laboratory



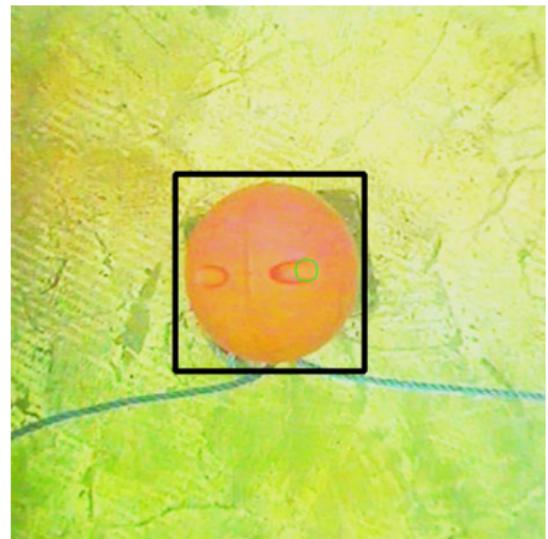
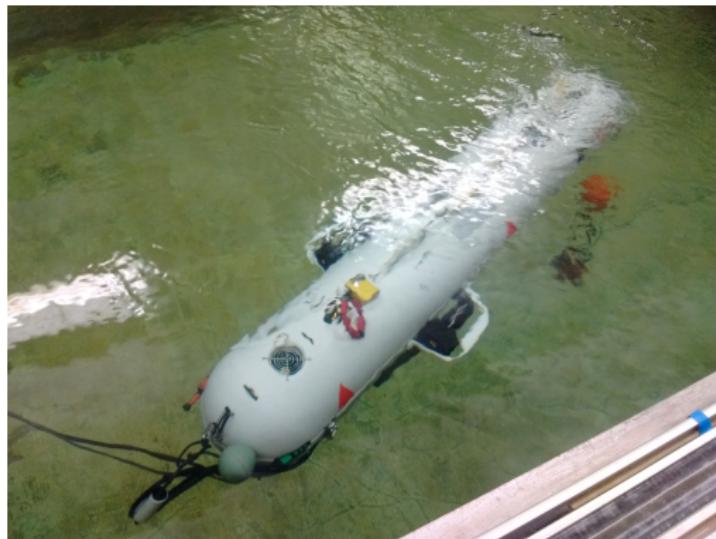
Ocean System Laboratory



Objectifs

Tester une boucle de commande en vision

Centrer la bouée orange dans l'image à une profondeur constante



Les moyens

Capteurs

- Un DVL (Doppler Velocity Log) pour mesurer la vitesse du robot par rapport au fond du bassin
- Un profondimètre
- Un compas
- Une camera couleur 640x480

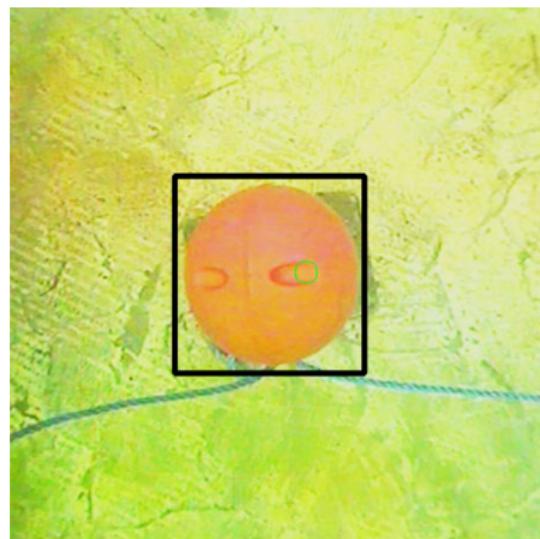
Commande

- Une commande haut-niveau qui calcule la vitesse du robot à partir des informations visuelles
- Une commande bas-niveau qui contrôle les propulseurs à partir de la consigne vitesse ¹

¹C. Barbalata, V. De Carolis, M. W. Dunnigan, Y. Pétillot and D. Lane, "An adaptive controller for autonomous underwater vehicles", IROS, 2015.

Procédure de détection de la bouée orange

Premier pas pour la mise en œuvre de l'asservissement : détection de la bouée



Procédure de détection de la bouée orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny²

²J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

³S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

Procédure de détection de la bouée orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny²
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)³

²J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

³S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

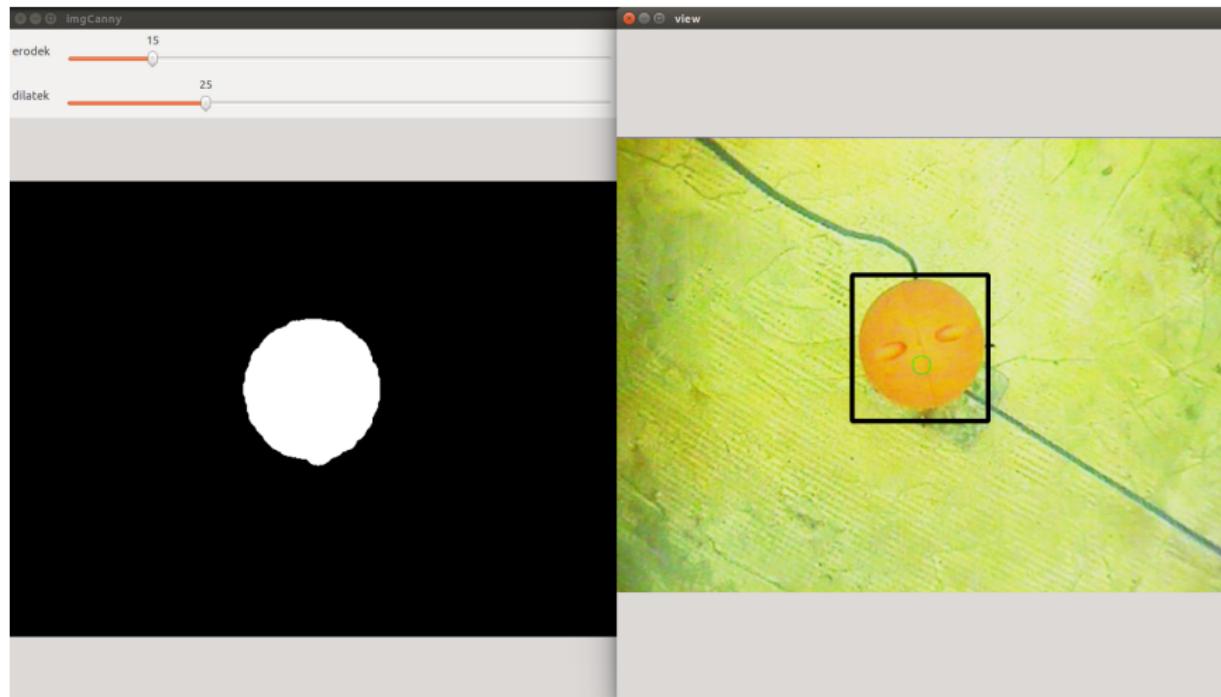
Procédure de détection de la bouée orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny²
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)³
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit

²J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

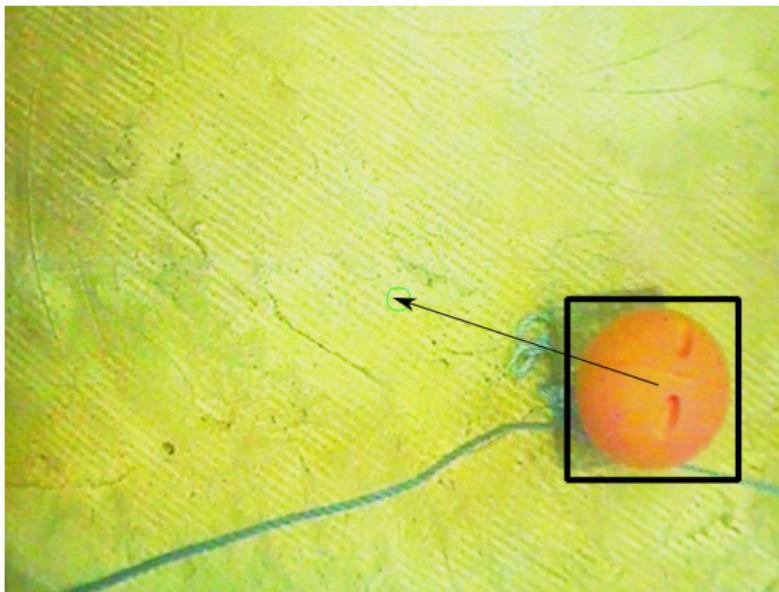
³S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

Résultat de la détection



Commande proportionnelle en translation

Objectif : centrer la bouée dans l'image à une profondeur constante



Commande proportionnelle en translation

Contrôle de 3 DDL basé sur les moments d'ordre 0 et 1⁴ en utilisant une version simplifié de la **matrice d'interaction**

$$\begin{cases} e_x = P_x^* - P_x \\ e_y = P_y^* - P_y \\ e_z = A^* - A \end{cases}$$

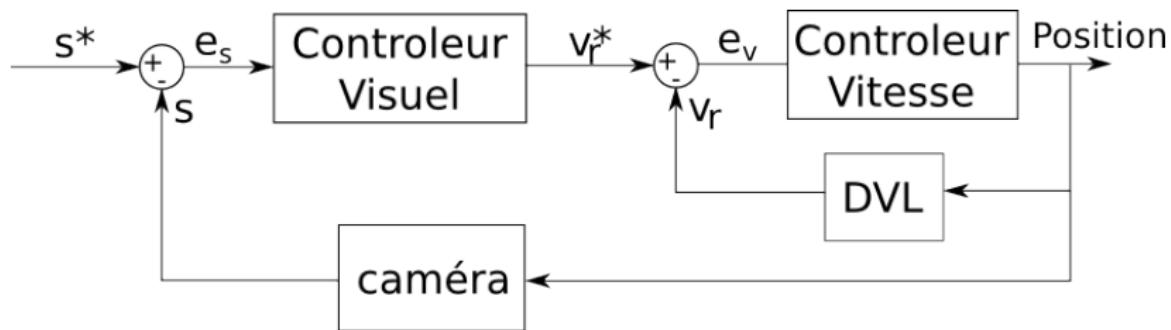
$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{K} \cdot \mathbf{e}_{img}$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{J}_c^r \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{e}_{img}$$

⁴O. Tahri and F. Chaumette, "Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects" in IEEE Transactions on Robotics, Dec. 2005.

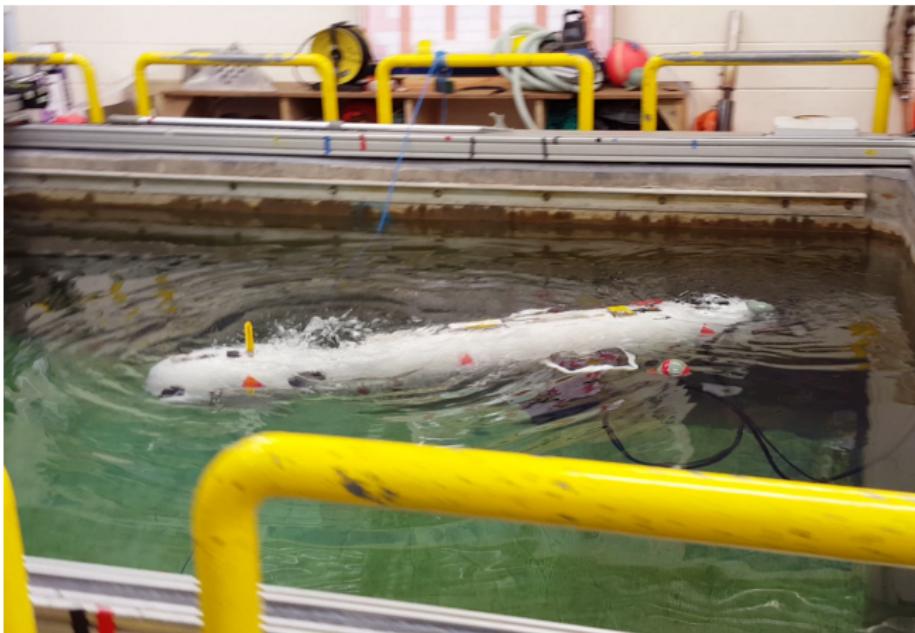
Boucle de contrôle



Validation en simulation



Validation expérimentale



Gestion de la laisse à partir de la vision

- Deux robots terrestres liés par une corde passive
- Le robot de tête se déplace librement et le deuxième robot doit le suivre en analysant l'image de la corde

La plateforme d'expérimentation

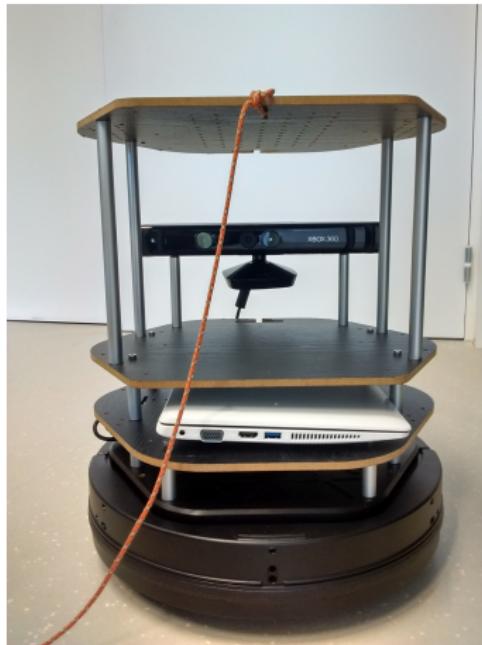
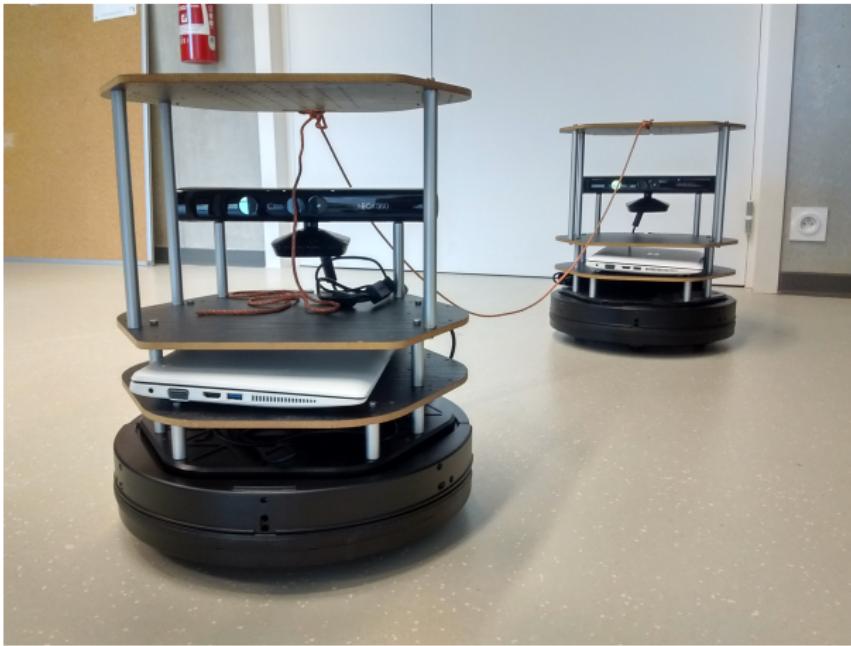


Figure : Le turtlebot

Le scénario d'expérimentation



Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis long temps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères

⁵Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

⁶Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

⁷Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis long temps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères
- Les robots à laisse sont utilisés en exploration planétaire afin de pouvoir accéder à des terrains irréguliers et inconnus. La laisse peut être très utile dans le processus de docking⁵ et aussi ramener le robot à la station d'atterrissement⁶

⁵Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

⁶Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

⁷Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis long temps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères
- Les robots à laisse sont utilisés en exploration planétaire afin de pouvoir accéder à des terrains irréguliers et inconnus. La laisse peut être très utile dans le processus de docking⁵ et aussi ramener le robot à la station d'atterrissement⁶
- Dans l'espace, ce type de robot est utilisé en opérations de maintenance en orbite, assemblage et nettoyage de débris⁷

⁵Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

⁶Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

⁷Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

Tethered-assisted rover docking

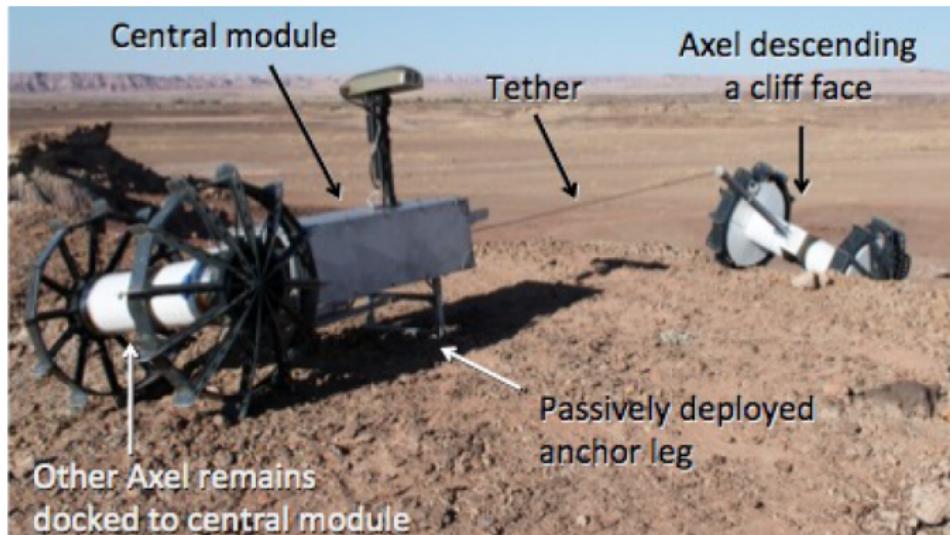


Figure : Le rover axel

⁵Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

Tethered-assisted rover docking

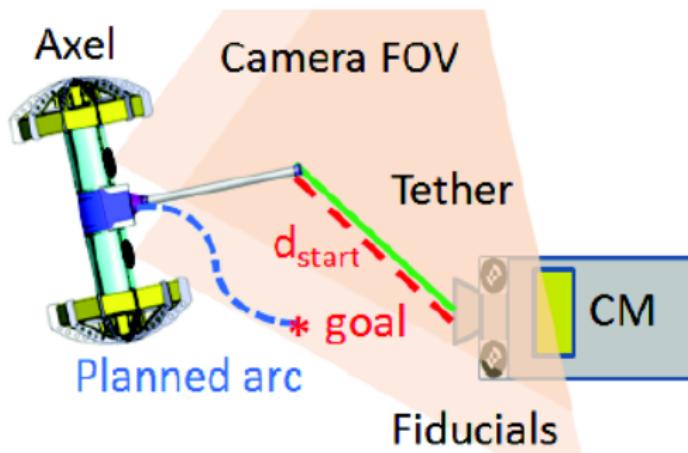
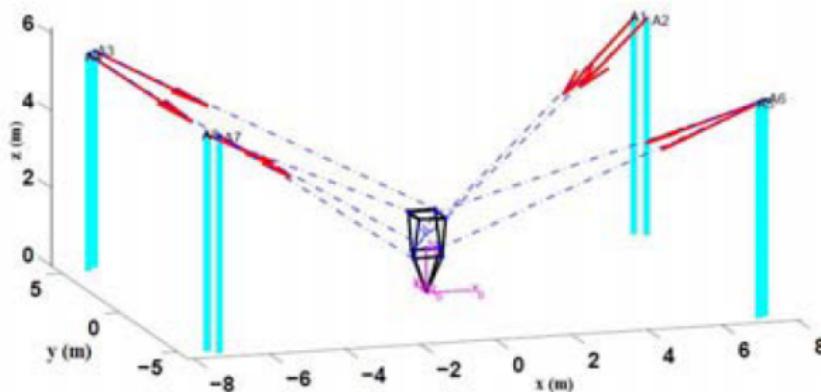


Figure : La procédure de dockage

⁵Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

Recherche bibliographique

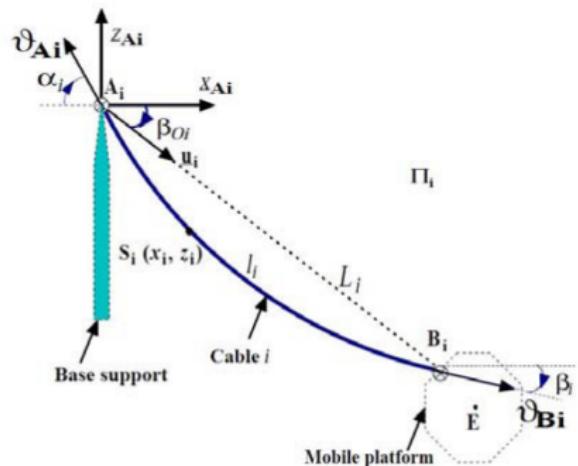
Récemment une méthode d'asservissement visuel a été proposé pour les robots à câbles parallèles⁸



⁸Dallej, T.; Gouttefarde, M.; Andreff, N.; Dahmouche, R.; Martinet, P.
Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots.
IROS 2012.

Recherche bibliographique

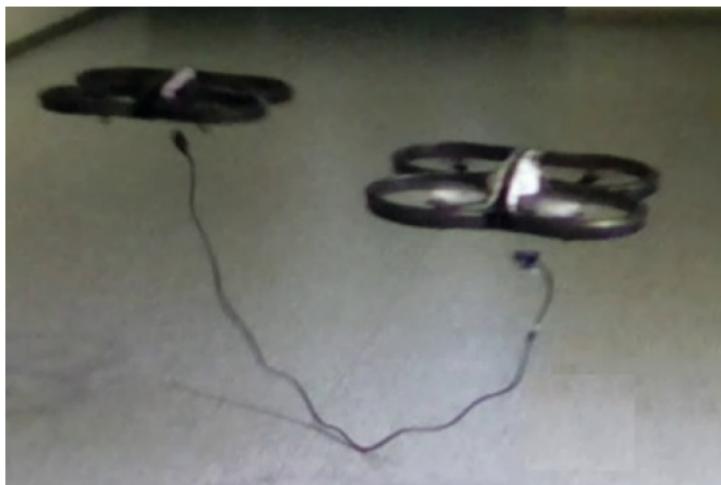
Récemment une méthode d'asservissement visuel a été proposé pour les robots à câbles parallèles⁸



⁸Dallej, T.; Gouttefarde, M.; Andreff, N.; Dahmouche, R.; Martinet, P.
Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots.
IROS 2012.

Recherche bibliographique

La forme de la chaînette a été pris en compte pour le transport aérien d'objets déformables afin de répartir équitablement le poids de l'objet parmi les robots⁹



⁹Estevez, J.; Graña, M. Robust Control Tuning by PSO of Aerial Robots Hose Transportation. Bioinspired Computation in Artificial Systems: IWINAC_2015

Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent

Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent
- Il y a un manque d'algorithmes basé vision pour gérer de la laisse et réduire de perturbations environnantes

Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent
- Il y a un manque d'algorithmes basé vision pour gérer de la laisse et réduire de perturbations environnantes
- Le concept de la cordée de robots peut être appliqué dans la robotique terrestre et aérienne pour le transport de matériaux déformables et l'exploration de milieux sévères

Procédure de détection de la corde orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit

Procédure de détection de la corde orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit
- Transformée de Hough pour la détection de lignes

Résultat de la détection



Les paramètres de la chaînette

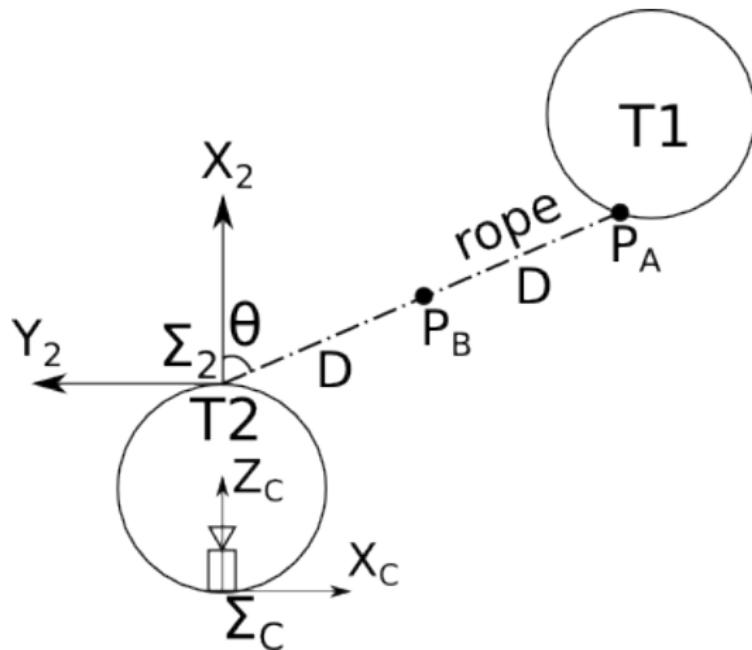
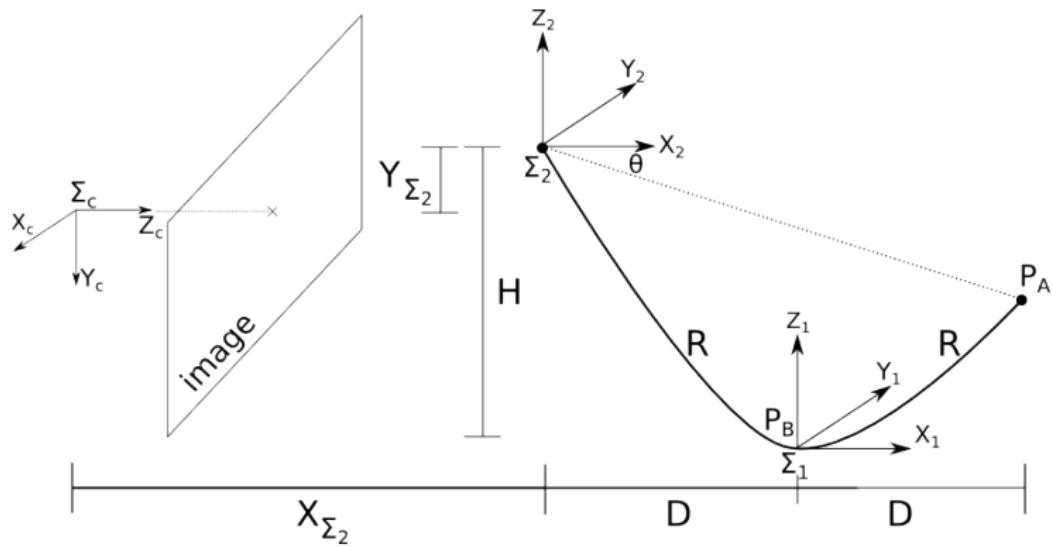
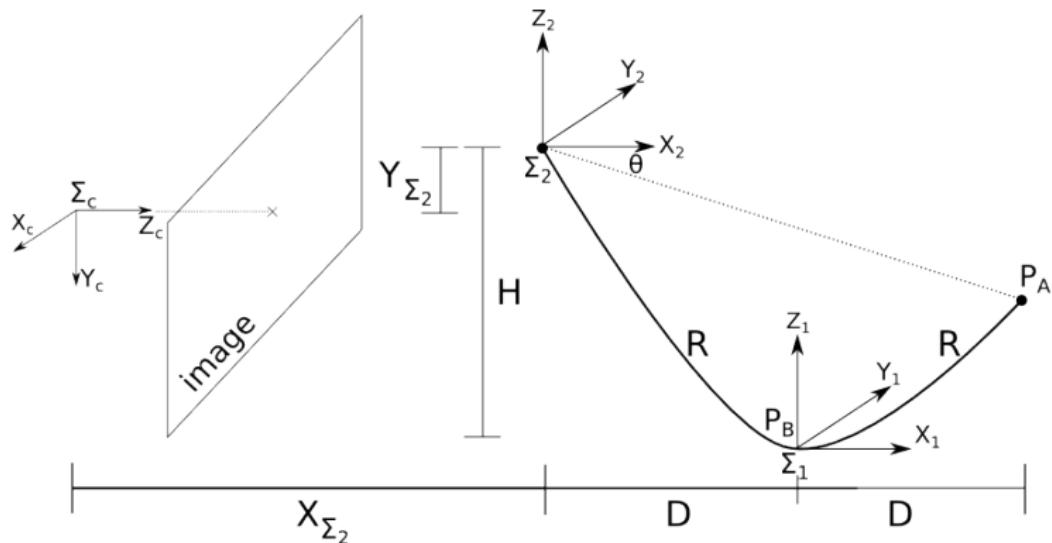


Figure : Vue de dessus du scénario d'expérimentation

Les paramètres de la chaînette

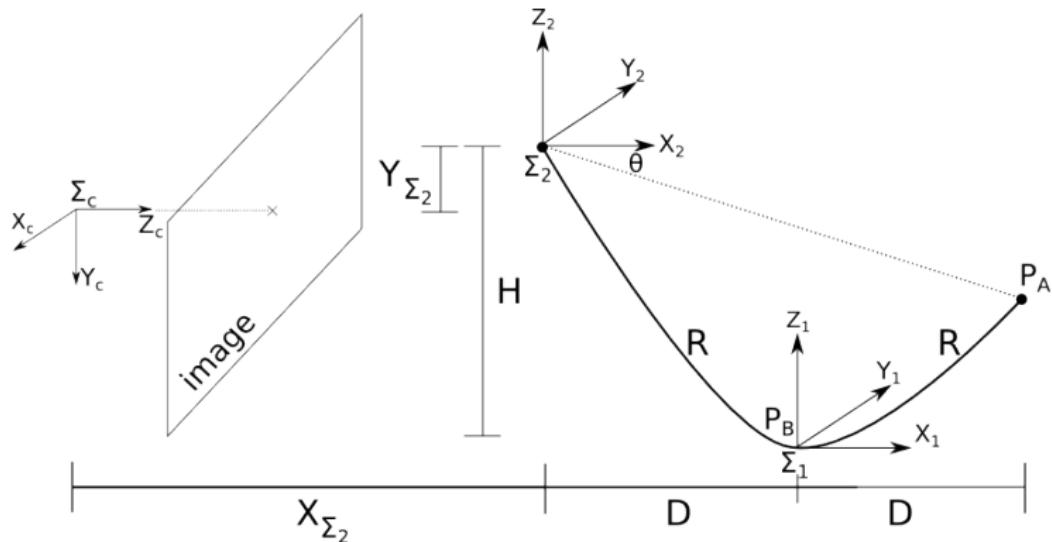


Les paramètres de la chaînette



$$\Sigma_C : Y = -\frac{1}{C} \left[\cosh \left(C \left(-\frac{X}{\sin \theta} - D \right) \right) - 1 \right] + H + Y_{\Sigma 2}$$

Les paramètres de la chaînette



$$\Sigma_C : Y = -\frac{1}{C} \left[\cosh \left(C \left(-\frac{X}{\sin \theta} - D \right) \right) - 1 \right] + H + Y_{\Sigma 2}$$

Estimation des paramètres de la chaînette

L'équation de la chaînette est composée de deux paramètres, H et $\sin \theta$, puisque $C = f(H)$ et $D = g(H)$. Donc, nous pouvons affirmer que

$$Y = f(X, a, b, Y_{\Sigma 2}),$$

où $Y_{\Sigma 2}$ est une constante et $a = \frac{H}{H_{max}}$ et $b = \sin \theta$.

Estimation des paramètres de la chaînette

L'équation de la chaînette est composée de deux paramètres, H et $\sin \theta$, puisque $C = f(H)$ et $D = g(H)$. Donc, nous pouvons affirmer que

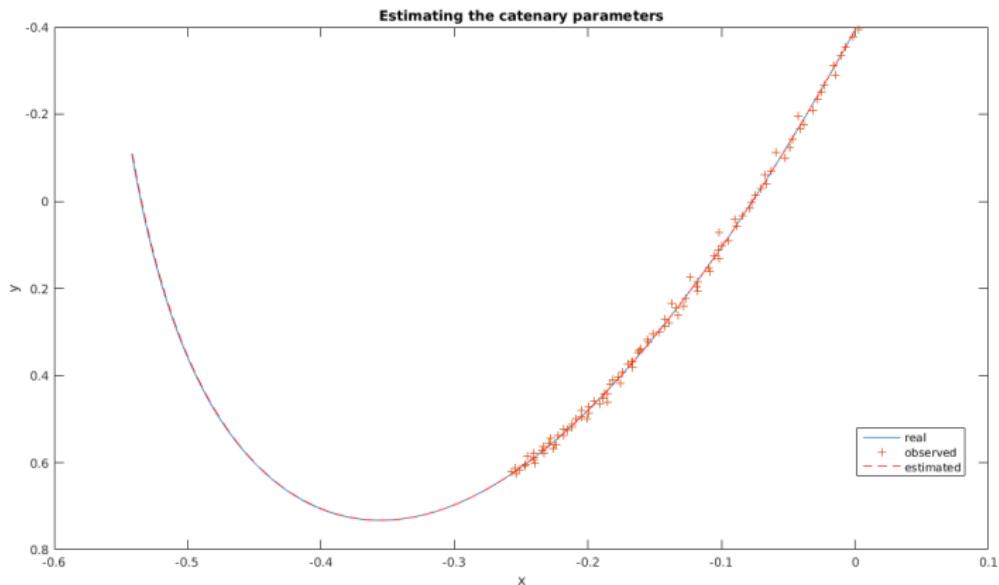
$$Y = f(X, a, b, Y_{\Sigma 2}),$$

où $Y_{\Sigma 2}$ est une constante et $a = \frac{H}{H_{max}}$ et $b = \sin \theta$.

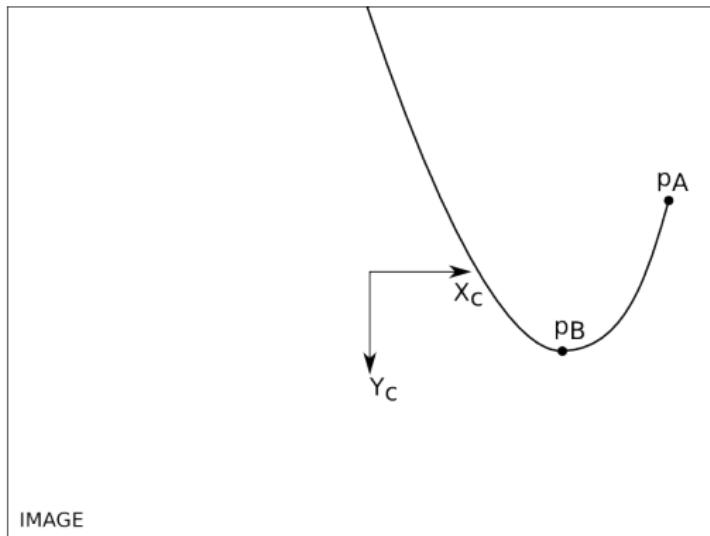
Estimation

Après la projection de l'équation dans le plan image, nous pouvons utiliser une méthode d'optimisation, comme l'algorithme de Gauss-Newton, pour estimer les paramètres a et b

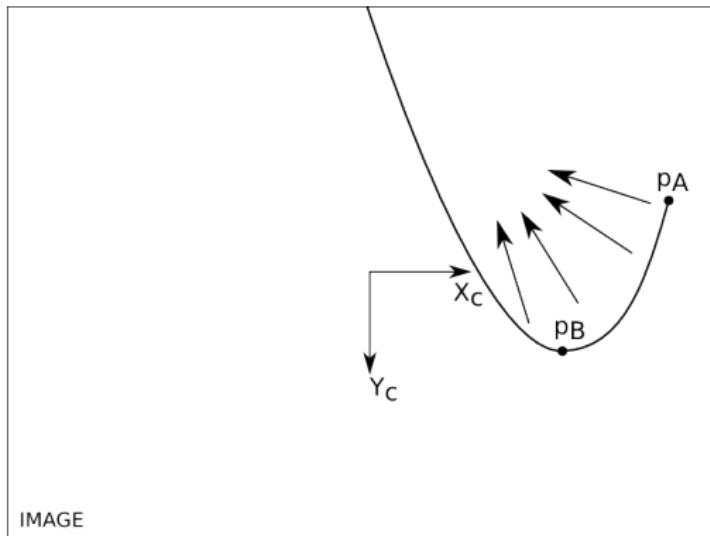
Résultat de l'estimation des paramètres



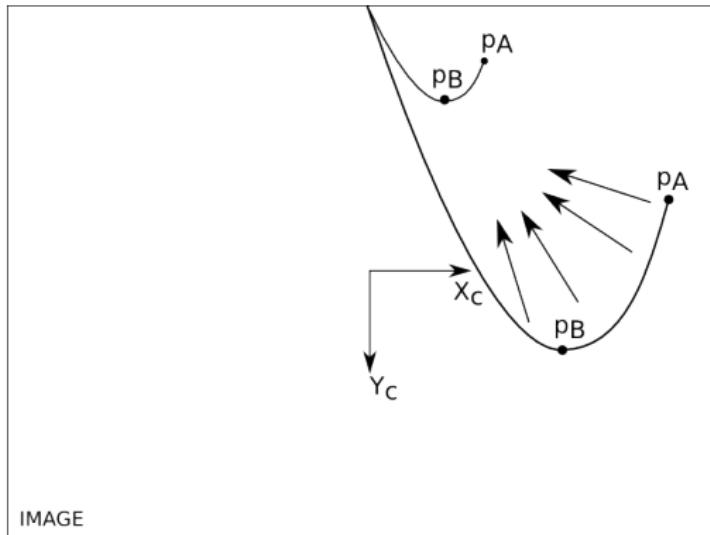
Asservissement visuel



Asservissement visuel



Asservissement visuel



Asservissement visuel

Le rapport entre le mouvement du robot et l'évolution des caractéristiques visuelles est donné par une matrice d'interaction¹⁰ :

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{bmatrix}.$$

À partir de la différence entre les valeurs courantes et désirées des paramètres, nous pouvons calculer la commande en vitesse :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \cdot \mathbf{L}^\dagger \cdot \mathbf{e},$$

où \mathbf{v}_c est la vitesse de la caméra, λ est un gain positif, \mathbf{L}^\dagger est la pseudo-inverse de \mathbf{L} et $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$

¹⁰F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. I. Basic approaches," in IEEE Robotics and Automation Magazine, Dec. 2006

Asservissement visuel

Le rapport entre le mouvement du robot et l'évolution des caractéristiques visuelles est donné par une matrice d'interaction :

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{bmatrix}.$$

À partir de la différence entre les valeurs courantes et désirées des paramètres, nous pouvons calculer la commande en vitesse :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \cdot \mathbf{L}^\dagger \cdot \mathbf{e},$$

où \mathbf{v}_c est la vitesse de la caméra, λ est un gain positif, \mathbf{L}^\dagger est la pseudo-inverse de \mathbf{L} et $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$

Prochaine étape

Valider expérimentalement le calcul de la matrice d'interaction \mathbf{L} et la loi de commande

Conclusions

- Maîtrise de l'environnement de simulation et de l'architecture de contrôle
- Validation expérimentale d'un algorithme d'identification d'objet par sa couleur
- Réalisation d'un asservissement visuel d'un robot sous-marin dans un environnement contrôlé
- Validation en simulation de l'algorithme d'estimation de paramètres de la chaînette

Perspectives de développement

- Valider expérimentalement l'estimation de paramètres de la chaînette et la loi de commande en vision
- Publier un premier article
- Généraliser la loi de commande pour contrôler un robot sous-marin à 6 DDL
- Validation expérimentale en mer
- Tenir compte de l'hydrodynamique du système
- Utiliser des câbles enroulables

Prochaine plateforme d'expérimentation

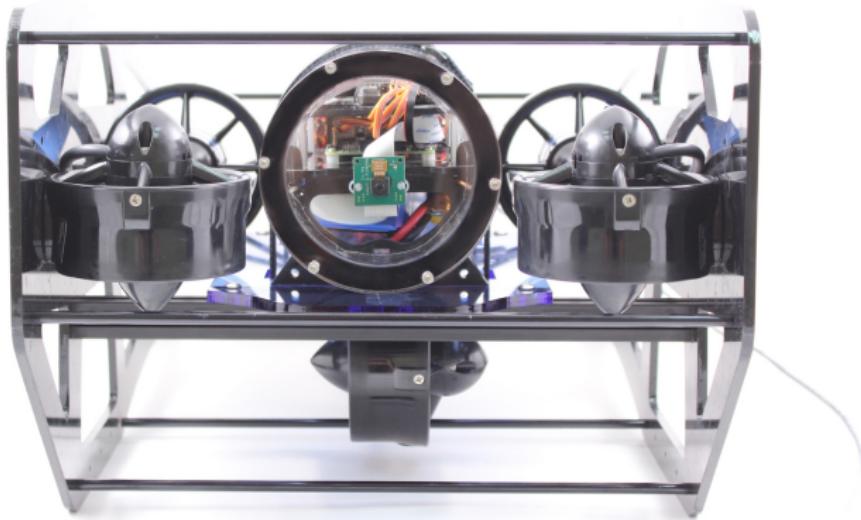


Figure : Le BlueROV