

Synthèse de systèmes de propulsion orientée tâche pour des AUV à propulseurs fixes ou vectoriels

E. DELALEAU^a, O. CHOCRON^{a,b}

delaleau@enib.fr, chocron@enib.fr

a. Département de Mécatronique.

École nationale d'ingénieurs de Brest,
Technopôle Brest-Iroise, CS 73862, 29 238 Brest, France.

b. Institut de Recherche Dupuy de Lôme, CNRS UMR 6027.

Résumé :

Ce travail propose une méthode de conception pour le système de propulsion des véhicules autonomes sous-marin (AUV en anglais) basée sur les tâches ou trajectoires à accomplir. La méthode s'adapte à des AUV comportant aussi bien des propulseurs fixes que des propulseurs vectoriels. Elle est basée sur les modèles cinématiques et dynamiques inverses d'un AUV effectuant une tâche de suivi de trajectoire.

Nous déterminons d'abord l'exigence d'actionnement en termes d'efforts de propulsion selon la tâche à accomplir. Ces efforts sont ensuite utilisés pour générer les capacités de propulsion sous la forme d'une "matrice de configuration de poussée" (TCM en anglais). Cette matrice dépend des positions et orientations des propulseurs, mais aussi des angles de poussée (commandés) des propulseurs vectoriels. D'une manière générale, cette matrice est compatible avec toute trajectoire cartésienne désirée et peut inclure des propulseurs fixes ou vectoriels. De cette matrice peut être extrait le nombre, les types, positions et orientations des propulseurs constituant le système de propulsion adapté. Ainsi, les capacités de propulsion du robot correspondront aux caractéristiques de la trajectoire et il sera capable de la suivre.

Mots-clés : Véhicule sous-marin autonome (AUV), Système de propulsion vectorielle, Conception orientée tâche, Commandabilité sur une trajectoire.

Abstract :

This work proposes a design method for the propulsion system of autonomous underwater vehicles (AUVs) based on the to be accomplished tasks or trajectories. The method adapts to AUVs involving both fixed and vector thrusters. It is based on the inverse kinematic and dynamic models of the AUV performing a task of trajectory tracking.

We first determine the actuation requirement in terms of propulsion effort according to the required task. These efforts are thus used to generate propulsion capabilities in the form of a "Thrust configuration matrix" (TCM). This matrix depends on the positions and orientations of the thrusters, but also thrust controlled angles of vector thrusters. In general, this matrix is compatible with any desired Cartesian trajectory and may include fixed or vector thrusters. From this matrix can be extracted the number, the

type, position and orientation of thrusters constituting the obtained propulsion system. Thus, the robot's propulsion capabilities will match the characteristics of the to-be-followed trajectory.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Vector propulsion system, Task-Oriented Design, Trajectory Commandability.

1 Introduction

Grâce à leur autonomie opérationnelle, les véhicules autonomes sous-marins (AUV) peuvent effectuer de nos jours des missions longues, à grande distance et en haute mer. Ce type de véhicules est également utilisé dans les opérations off-shore, pour cartographier les fonds sous-marins, préparer des installations, sécuriser les ports, rechercher des objets sur les fonds, entre autres activités [1]. Avec assez d'efforts de recherche, les capacités des AUV seront encore étendues dans le futur, leur permettant d'effectuer des tâches encore plus exigeantes, comme la maintenance des systèmes d'énergie marine renouvelables.

Justement, la plupart des AUV sont conçus pour des applications spécifiques comme indiqué dans [17]. Pour un AUV à longue portée (croiseurs), l'attention est portée sur la réduction des forces de traînée et sur l'efficacité du propulseur afin de réduire la consommation d'énergie et de fournir à l'AUV plus d'autonomie. Habituellement sous-actionnés, ce type de véhicules est généralement propulsé par un propulseur arrière et dirigé par des gouvernes [2]. La coque a une conception hydrodynamique afin de réduire les forces de traînée et d'améliorer les capacités d'autonomie de l'AUV. A contrario, les AUV manoeuvrables (ou stationnaires) doivent avoir au moins autant de propulseurs que la dimension de leur espace opérationnel, généralement six. Leur conception est axée sur l'agilité, c'est à dire la manoeuvrabilité multidirectionnelle (ou holonomie) et la vivacité, ce qui rend très énergivores ([19]).

En ce qui concerne le système de propulsion, plusieurs architectures existent. On peut les diviser en trois catégories : propulsion arrière et gouvernes [26], propulsion biomimétique [28, 29, 11] et propulsion vectorielle [5]. Cette dernière a l'avantage de fournir une manoeuvrabilité maximale et peut être obtenue par différents moyens. Certains utilisent des hélices à pas variable avec un plateau cyclique [15], alors que d'autres utilisent des alliages à mémoire de forme pour modifier les pales [27]. La propulsion vectorielle peut plus prosaïquement être obtenue en ajoutant des forces provenant de plusieurs propulseurs fixes [22, 23] ou, d'une manière plus rationnelle, en utilisant des hélices réorientables [14, 6, 24]. Pour cette dernière approche, on peut utiliser un mécanisme d'orientation du propulseur pour contrôler la direction de poussée [3, 20, 21, 13, 12, 16]. Une autre solution consiste à n'orienter que l'hélice, grâce à un accouplement compliant, comme nous l'avons déjà proposé avec le propulseur magnéto-couplé reconfigurable (PMCR) [7].

Malheureusement, la complexité des modèles dynamiques pour les AUVs et l'utilisation de systèmes de propulsion sous-actionnés, redondants ou dont les actions sont couplées, rendent difficile l'évaluation de la pertinence des différentes solutions par rapport à une tâche robotique donnée. Afin de répondre à ce problème, nous avons proposé une méthode d'analyse et de synthèse pour les AUV à propulseurs fixes [4]. Dans ce nouveau travail, nous élargissons la gamme d'actionneurs dans les architectures de propulsion proposées aux propulseurs vectoriels, afin de réaliser le suivi de trajectoires de référence plus exigeantes. Une nouvelle forme variable de la matrice de configuration de poussée (TCM) est proposée, incluant trois types de propulseurs : fixes et vectoriels à 1 ou 2 axes reconfigurables. La matrice

TCM variable est ensuite analysée, puis une base de propulseurs fixes et vectoriels pouvant la générer est construite. La méthode est d'abord appliquée pour analyser l'AUV de référence (robot RSM) sur une tâche complexe (composée de trois trajectoires s'inscrivant dans la maintenance de système EMR), puis utilisée pour synthétiser l'ensemble des systèmes de propulsion compatibles avec cette tâche. Les missions des AUVs ainsi équipés et contrôlés par bouclage dynamique linéarisant sont simulées, afin de comparer les différentes topologies propulsives et vérifier leur adéquation avec la mission.

2 Modélisation dynamique du robot et de sa propulsion

2.1 Modèles cinématique et dynamiques de l'AUV

Pour modéliser l'AUV, deux systèmes de coordonnées orthogonaux sont utilisés : $R_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$ est le repère fixe (lié à la terre) et $R_b(O_b, x_b, y_b, z_b)$ est le repère mobile (lié au robot, voir la figure 1).

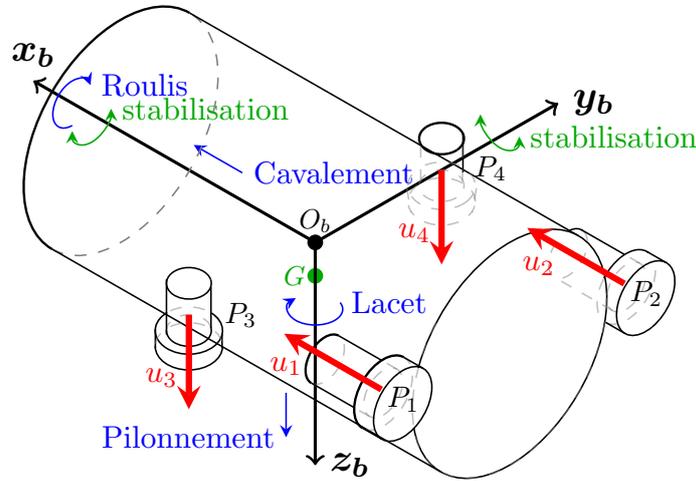


FIGURE 1 : AUV RSM-Fixe : architecture à 4 propulseurs fixes

Les vecteurs décrivant le mouvement à 6 degrés de liberté (DDL) de l'AUV sont [9] :

$$\boldsymbol{\eta} = (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi)^t, \quad \boldsymbol{\nu} = (u \ v \ w \ p \ q \ r)^t, \quad \dot{\boldsymbol{\eta}} = \left. \frac{d\boldsymbol{\eta}}{dt} \right|_{R_0} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\nu} \quad (1)$$

Le vecteur $\boldsymbol{\eta}$ regroupe la position et l'orientation définies par rapport à R_0 . L'orientation est définie à l'aide de la convention d'angles d'Euler ZYX (ϕ, θ, ψ), équivalente à la convention Roulis-Tangage-Lacet RPY (ψ, θ, ϕ). $\boldsymbol{\nu}$ est le vecteur vitesse par rapport à R_0 (linéaire et angulaire), projeté dans R_b . En utilisant la matrice de transformation $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$, nous obtenons les vitesses absolues exprimées dans R_0 .

Les équations dynamiques non linéaires du robot sous-marin, peuvent être formulées comme suit : [1] :

$$\mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

où $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ et $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ sont les matrices de masse, de couplage, et d'amortissement respectivement. $\mathbf{G}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^6$ est le vecteur des efforts gravitationnels et d'Archimède. Enfin, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6$ est le torseur des efforts de propulsion (forces et moments). Les effets hydrodynamiques dus à

l'inertie de l'eau et aux forces de traînée sont inclus dans les matrices de l'équation (2) via la méthode des masses ajoutées introduite par [9] et utilisée dans [1] et dans nos précédents travaux [8].

τ peut être obtenu à partir du produit d'une matrice de configuration de propulsion \mathbf{B} (TCM en anglais) et d'un vecteur des poussées \mathbf{u} incluant les forces de poussée produites par les propulseurs [9] :

$$\tau = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (3)$$

2.2 Modèles du système de propulsion

2.2.1 Propulsion fixe (AUV RSM-Fixe)

Les AUV avec ce type de propulsion associent plusieurs propulseurs placés selon différents axes afin de combiner leur vecteur de poussée et générer une propulsion de six (ou moins)DDL au robot. Le robot RSM (Fig. 1) est un exemple classique de cette architecture. Il comprend deux propulseurs horizontaux qui sont placés à l'arrière de l'AUV et deux autres verticaux, centrés longitudinalement sur les côtés.

Cette configuration permet au robot RSM-Fixe d'actionner les 4 DDL (dans R_b) suivants :

- Cavalement (translation sur l'axe x_b)
- Pilonnement (translation sur l'axe z_b)
- Roulis (rotation sur l'axe x_b)
- Lacet (rotation sur l'axe z_b)

En raison de cette configuration, 2 DDL ne sont pas actionnés :

- Tangage (rotation sur l'axe y_b)
- Embardée (translation sur l'axe y_b)

Les mouvements de roulis et de tangage sont mécaniquement stabilisés grâce à la position relative du centre de gravité (G) et de carène (O_b). À l'inverse du roulis et du tangage, l'embardée n'est ni contrôlée, ni stabilisée, ce qui implique qu'une translation libre (dérive) soit présente sur l'axe y_b .

La position des quatre propulseurs fixes dans R_b sont :

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} P_{2x} \\ P_{2y} \\ P_{2z} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} P_{3x} \\ P_{3y} \\ P_{3z} \end{bmatrix}, \mathbf{P}_4 = \begin{bmatrix} P_{4x} \\ P_{4y} \\ P_{4z} \end{bmatrix}$$

La matrice de configuration de propulsion pour le robot RSM fixe est donc :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & P_{3y} & P_{4y} \\ P_{1z} & P_{2z} & -P_{3x} & -P_{4x} \\ -P_{1y} & -P_{2y} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{avec } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

où u_1, u_2, u_3 et u_4 sont les poussées des propulseurs. Si la matrice B est inversible, alors l'AUV est commandable sur tous les axes correspondant à ses lignes (6 DDL dans le cas général). Dans ce cas, il sera possible de générer le vecteur des poussées par : $\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}\boldsymbol{\tau}$, où $\boldsymbol{\tau}$ est le torseur de propulsion désiré.

Nous avons montré dans nos travaux précédents [4] que lorsque l'AUV était sous-actionné ($\text{rg}(\mathbf{B}) < 6$), le robot n'était plus commandable en général mais pouvait l'être pour une trajectoire de dimension réduite dont on pouvait déterminer le sous-espace dans R_0 . Dans le cas du robot RSM, les trajectoires à 3 DDL dans l'espace affine (position xyz) pouvaient être suivies, mais que l'angle de lacet ne pouvait pas être contrôlé simultanément. Si une trajectoire demandait à contrôler le lacet, il fallait soit ajouter un propulseur d'étrave au robot RSM, soit modifier sa configuration propulsive pour conserver 4 DDL.

2.2.2 Propulsion vectorielle (AUV RSM-Vect)

Le principe de la propulsion vectorielle intégrale est d'utiliser un seul propulseur pour générer plusieurs axes d'actionnement, en ré-orientant le vecteur de poussée à l'aide d'un servomécanisme (propulsion reconfigurable). Ainsi un nombre réduit de propulseurs pourra générer un espace de dimension supérieur (idéalement à 6 DDL). Le modèle que nous proposons d'étudier pour illustrer (voir figure 2) ce type d'AUV est le robot RSM débarrassé de ses propulseurs fixes et muni d'un propulseur vectoriel unique à l'arrière implanté selon les axes du robot (R_b) et possédant 3 DDL en tout, dont 2 pour la reconfiguration.

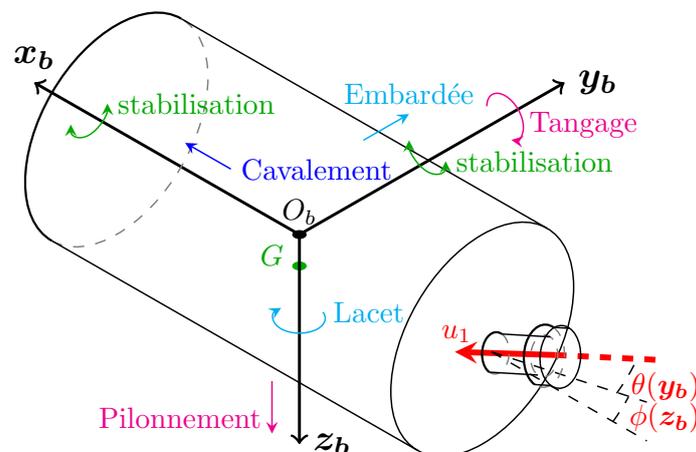


FIGURE 2 : AUV RSM-Vec : architecture à 1 propulseur vectoriel

Ainsi, ce propulseur est ré-orientable sur deux axes : Autour de l'axe z_b selon l'angle ϕ et autour de l'axe y_b selon l'angle θ . La convention d'angle d'Euler ZYX ($\phi, \theta, \psi \equiv 0$), avec l'angle de roulis ψ neutralisé (car inopérant sur la poussée \mathbf{u}), nous permet d'obtenir la matrice \mathbf{B} à une colonne correspondante :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} c\theta c\phi \\ c\theta s\phi \\ -s\theta \\ -s\theta P_y - c\theta s\phi P_z \\ c\theta c\phi P_z + s\theta P_x \\ c\theta s\phi P_x - c\theta c\phi P_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = [u], \quad \boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5)$$

Sur l'exemple de la Figure 2 on constate qu'un propulseur vectoriel peut être vu comme la combinaison de propulseurs scalaires : En décomposant la "partie force" (les 3 premières lignes de la matrice $\mathbf{B}\mathbf{u}$ sur les 3 axes du repère lié au propulseur dans sa position neutre, c'est-à-dire en posant :

$$u_x = c\theta c\phi u \quad (6a)$$

$$u_y = c\theta s\phi u \quad (6b)$$

$$u_z = -s\theta u \quad (6c)$$

Il est possible d'inverser ce modèle pour obtenir les trois commandes (u, ϕ, θ) du propulseur vectoriel à partir des composantes de poussée désirée (selon les axes x_b , y_b et z_b). Soit le vecteur de poussée désirée \mathbf{u}_d défini par ses composantes de propulsion élémentaires u_x , u_y et u_z dans R_b :

$$\begin{aligned} u &= \|\mathbf{u}_d\| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \\ \phi &= \arctan2(u_y, u_x), \theta \neq \pm \frac{\pi}{2} \\ \theta &= \arcsin\left(\frac{-u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}}\right), \theta \in]-\frac{\pi}{2} \dots \frac{\pi}{2}[\end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Si } u_x = u_y = 0, \text{ alors } u = |u_z|, \phi = 0, \theta = \text{sign}(u_z) \frac{\pi}{2}$$

Cette configuration permet au robot RSM-Vect d'actionner 3 DDL parmi les 5 suivants (dans R_b) : Cavalement, embardée, pilonnement, tangage et lacet. Les 2 axes restants ne seront pas contrôlés, mais seront perturbés par l'actionnement des 3 DDL choisis. La stratégie de commande de ce robot sera discutée dans les sections suivantes, mais il apparaît d'ores et déjà avec les formules d'inversion (Eq. 7), qu'il est possible de contrôler les 3 DDL avec (u_x, u_y, u_z) en sacrifiant les 2 DDL de rotations. Le DDL de roulis étant stabilisé, il apparaît que cette fois, c'est le lacet qui ne sera pas contraint (dérive à prévoir).

2.3 Contrôle nominal par anticipation

Pour analyser le système de propulsion en rapport à la trajectoire, nous devons estimer les efforts nécessaires pour mouvoir l'AUV le long de la trajectoire. Nous utilisons les modèles cinématique et dynamique pour calculer les efforts demandés (d'anticipation) τ_a pour suivre exactement la trajectoire désirée η_d .

La méthode d'anticipation que nous proposons, va simplement "coller" l'AUV sur la trajectoire tel que $\eta \equiv \eta_d$. L'effort propulsif τ_a peut être compris comme le "contrôle nominal", guidant idéalement l'AUV sur la trajectoire de référence (voir [18] dans l'esprit conception et [10] dans une perspective de contrôle). Pour procéder, nous utilisons le modèle cinématique inverse pour obtenir la vitesse d'anticipation (torseur cinématique) ν_a . Ensuite, nous injectons cette vitesse cible dans le modèle dynamique inverse pour calculer les efforts d'anticipation (torseur des efforts de propulsion) τ_a correspondant.

Le point O_e est un point arbitraire appartenant à l'AUV, auquel nous voulons faire suivre la trajectoire

désirée η_d . On peut écrire la vitesse ν_e du point O_e dans R_b à partir de la vitesse ν_a de l'AUV en O_b :

$$\nu_e = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ 0 & 1 & 0 & -\epsilon_z & 0 & \epsilon_x \\ 0 & 0 & 1 & \epsilon_y & -\epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}} \underbrace{\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}}_{\nu_a}, \quad \mathbf{r}_e = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \overrightarrow{O_b O_e} \quad (8)$$

\mathbf{r}_e est le vecteur position du point O_e dans R_b et \mathbf{T} est la matrice de transport des vitesses ν depuis O_e vers O_b . En considérant l'AUV sur la trajectoire désirée à tout instant, les équation (1) et (8) mènent à :

$$\dot{\eta}_e \equiv \dot{\eta}_d = \mathbf{J}(\eta_e \equiv \eta_d) \nu_e = \mathbf{J}(\eta_d) \mathbf{T} \nu_a \quad (9)$$

Avec $\dot{\eta}_e$, les vitesses de O_e dans R_0 . Ce qui permet d'exprimer la vitesse d'anticipation ν_a de l'AUV dans R_b en fonction de la vitesse de la trajectoire désirée $\dot{\eta}_d$ dans R_0 :

$$\nu_a = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{J}(\eta_d)^{-1} \dot{\eta}_d \quad (10)$$

En utilisant l'équation du modèle dynamique de l'AUV (Eq. 2), nous obtenons le torseur des efforts de propulsion τ_a par anticipation de la trajectoire dans R_b :

$$\tau_a = \mathbf{M} \dot{\nu}_a + (\mathbf{C}(\nu_a) + \mathbf{D}(\nu_a)) \nu_a + \mathbf{G}(\eta_d) \quad (11)$$

Ces mêmes équations sont utilisées dans les contrôleurs par bouclage dynamique linéarisant que nous utilisons [25], en ajoutant un terme de correction proportionnelle à chaque équation pour le rétro-contrôle :

$$\begin{aligned} \nu_c &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{J}(\eta)^{-1} (\dot{\eta}_d + \mathbf{K}_{cin} e_{cin}) \\ \tau_c &= \mathbf{M} (\dot{\nu}_c + \mathbf{K}_{dyn} e_{dyn}) + (\mathbf{C}(\nu) + \mathbf{D}(\nu)) \nu + \mathbf{G}(\eta) \end{aligned} \quad (12)$$

$e_{cin} = \eta_d - \eta$, \mathbf{K}_{cin} et $e_{dyn} = \nu_c - \nu$, \mathbf{K}_{dyn} sont respectivement les erreurs de suivi et les gains proportionnels des commandes cinématique et dynamique. Dans la figure 3 est présentée la trajectoire de référence qui servira de mission pour l'AUV, ainsi que la trajectoire réalisée par le robot RSM à propulsion fixe (avec le contrôle dynamique). La figure 4 montre le torseur τ_a d'anticipation correspondant, Nous pouvons voir que pour les forces (première colonne), la propulsion est requise sur les 3 axes afin de maintenir le point O_e sur la trajectoire. Les forces d'inertie exigent plus d'efforts pendant les deux virages. Considérant les moments (deuxième colonne), les mouvements de roulis et de tangage ne nécessitent aucun effort en dehors des virages (la trajectoire étant plane) tandis que les virages génèrent de légers efforts en roulis et en tangage (dus aux effets centrifuges) qui sont limités par la stabilité de l'AUV. Enfin, la rotation en lacet nécessite un moment important en virage. Par conséquent, il est souhaitable pour cette trajectoire de construire un système de propulsion devant actionner tous les DDL de l'AUV, à l'exception des rotations en roulis et tangage qui seront stabilisés (mais pas contrôlés) mécaniquement. Ceci peut être résumé dans l'écriture du torseur d'anticipation sous sa forme dimensionnelle : $\tau_a = [* * * 0 0 *]^t$. On notera que toutes les étoiles (*) dans ce vecteur représentent des axes de l'AUV à actionner indépendamment. Les zéros correspondant à des axes à ne pas perturber (ou peu).

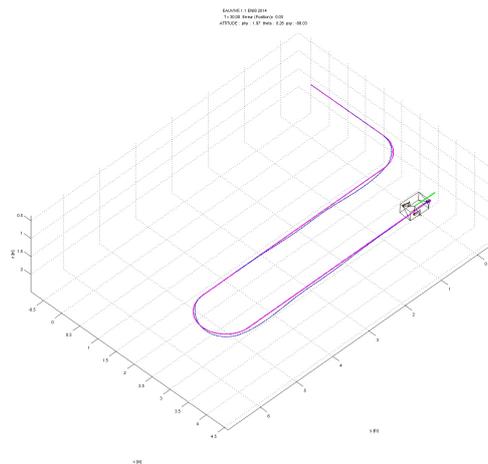
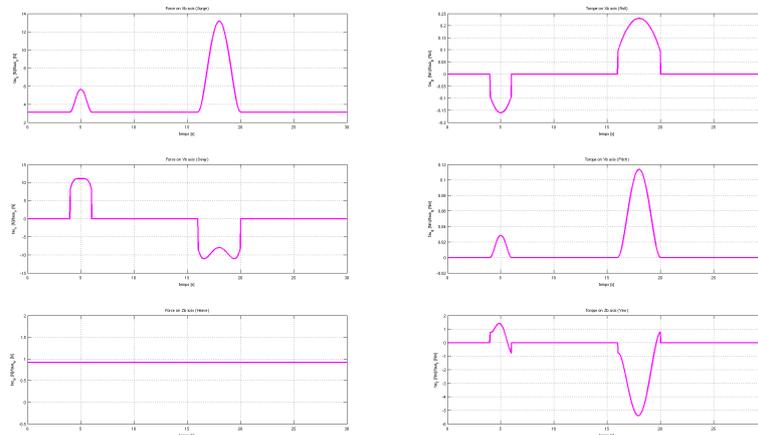


FIGURE 3 : Trajectoire de référence et réalisée par le robot RSM-Fixe

FIGURE 4 : Torseur des efforts de propulsion dans R_b obtenu par anticipation de la trajectoire. 1^{re} colonne (forces) : cavement, embardée et pilonnement. 2^{de} colonne (moments) : roulis, tangage et lacet.

3 Choix et synthèse d'un système de propulsion vectoriel

Dans cette section nous esquissons un algorithme de conception du système de propulsion et nous l'illustrons sur la conception d'un exemple d'AUV dédié à une mission particulière. Cet algorithme généralise celui proposé pour la conception de systèmes à propulseurs fixes développé dans [4]. La présentation complète dépasse le cadre de cette communication ; elle généralise celle de conception de systèmes à propulseurs fixes développé dans [4].

3.1 Rappel de la conception d'un système à propulseurs fixes

Nous savons que les propulseurs, même fixes, peuvent actionner un ou, de manière non indépendante, plusieurs degrés de liberté de l'AUV. Pour simplifier la conception nous avons retenu un sous ensemble de propulseurs fixes qui actionnent soit exactement 1 DDL (une translation) soit 2 DDL (1 translation + une rotation). Ces propulseurs élémentaires fixes sont listés dans la Table 1 [4] et constituent en quelque sorte une "base" suffisamment riche pour concevoir n'importe quelle configuration. Nous rappelons qu'il n'est pas possible d'activer une rotation indépendamment d'une translation et que cela représente une diffi-

culté pour la conception. Ce problème se complique pour les propulseurs vectoriels qui peuvent, selon leur configuration, actionner une ou plusieurs rotations simultanément et aussi plusieurs translations.

Il existe 9 types¹ de “propulseurs élémentaires”. De manière générique il sont appelés T_{\bullet} s’il n’active qu’une seule translation et $T_{\bullet\bullet}$ s’il active une rotation et une translation. Les indices “ \bullet ” peuvent prendre les valeurs x, y ou z .

TABLE 1 : Propulseurs de base et leurs efforts associés

Nom de la configuration	T_x	T_y	T_z	T_{yx}	T_{zx}	T_{xy}	T_{zy}	T_{xz}	T_{yz}
Position du propulseur	$\begin{bmatrix} P_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ P_y \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_x \\ 0 \\ P_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_x \\ 0 \\ P_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ 0 \end{bmatrix}$
Direction de la fore	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Couple produit	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -P_z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +P_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ +P_z \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -P_x \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_y \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ +P_x \end{bmatrix}$

Rappel de l’algorithme de conception dans le cas des propulseurs fixes :

- **Étape 1** : Choisir les propulseurs du type $T_{\bullet\bullet}$ pour “couvrir” toutes les rotations requises.
- **Étape 2** : Choisir d’autres propulseurs du type $T_{\bullet\bullet}$ de manière à couvrir tout ou partie des translation requises.
- **Étape 3** : Au besoin, compléter avec des propulseurs du type T_{\bullet} de manière à couvrir toutes les translations.

3.2 Modélisation d’un système à propulseurs vectoriel

3.2.1 Décomposition d’un propulseur vectoriel à un angle de reconfiguration

Ainsi, pour un propulseur vectoriel, situé en $O_p(P_x, P_y, P_z)$ dans R_b , nous avons la décomposition :

$$\mathbf{B}u = \begin{bmatrix} c\theta c\phi u \\ c\theta s\phi u \\ -s\theta u \\ -s\theta P_y u - c\theta s\phi P_z u \\ c\theta c\phi P_z u + s\theta P_x u \\ c\theta s\phi P_x u - c\theta c\phi P_y u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_z \\ -P_y \end{bmatrix} u_x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -P_z \\ 0 \\ P_x \end{bmatrix} u_y + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ P_y \\ -P_x \\ 0 \end{bmatrix} u_z \quad (13)$$

où chacun des 3 torseurs peut être obtenu à l’aide de 2 propulseurs de bases de la Table 1.

Par soucis de concision, cette communication se limite à l’analyse des propulseurs vectoriels à un angle de reconfiguration, selon l’angle ϕ (donc $\theta = 0$). Ces propulseurs ont donc 2 DDL : u et ϕ . Comme $\theta = 0$:

¹Des propulseurs de même type peuvent être placés à des endroits différents de l’AUV.

$$u_x = c\phi u \quad (14a)$$

$$u_y = s\phi u \quad (14b)$$

$$u_z = 0 \quad (14c)$$

On arrive à un torseur des efforts de la forme :

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} c\phi u \\ s\phi u \\ 0 \\ -s\phi P_z u \\ c\phi P_z u \\ s\phi P_x u - c\phi P_y u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_z \\ -P_y \end{bmatrix} u_x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -P_z \\ 0 \\ P_x \end{bmatrix} u_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & -P_z \\ P_z & 0 \\ -P_y & P_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

où u_x et u_y sont les composantes scalaires de la poussée du propulseur vectoriel. On peut extraire de u_x et u_y les variables de contrôle du propulseur vectoriel à 2 DDL (avec $\theta = 0$) : u, ϕ d'après l'équation (7).

3.2.2 Implantation des propulseurs à 2 DDL dans l'AUV

La section précédente analyse le propulseur vectoriel dans son repère propre $R_p(O_p, \mathbf{x}_p, \mathbf{y}_p, \mathbf{z}_p)$, il convient d'exprimer ses efforts dans le repère de l'AUV (R_b). Soit la matrice de rotation ${}^b\mathbf{R}_p$ pour passer de R_b vers R_p , le torseur des efforts du propulseur vectoriel s'écrit dans R_b :

$${}^b\boldsymbol{\tau}_a = {}^b\mathbf{R}_p {}^p\boldsymbol{\tau}_a = {}^b\mathbf{R}_p \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (16)$$

3.3 Conception d'un robot à deux propulseurs vectoriels

Nous cherchons à réaliser une structure d'AUV telle que $\boldsymbol{\tau}_a = [* * * 0 0 *]^t$ c'est-à-dire un robot sous-marin capable de manoeuvrer selon :

- 3 translations : cavalement, embardée et pilonnement ;
- 1 rotation : lacet.

Dans un travail précédent nous avons proposé un robot à propulseurs fixes pour réaliser cette tâche à 4 degrés de liberté [4]. Nous proposons ici de réaliser la tâche avec un AUV à deux propulseurs vectoriels (voir figure 5), ayant chacun un angle de reconfiguration ($2 \times 2 \text{ DDL} = 4\text{DDL}$).

1. Choix d'un propulseur vectoriel pour couvrir cavalement et lacet :

Implantation dans R_b :

- Poussée : $\mathbf{u}_{p1} = [u_{x1} \ u_{y1} \ 0]^t$
- Position : $\mathbf{P}_1 = [P_{x1}, 0, 0]^t$;
- Matrice de rotation : ${}^b\mathbf{R}_{p1} = \mathbb{I}_{3 \times 3}$

Le torseur du propulseur P_1 dans R_b est :

$$\tau_1 = {}^b\mathbf{R}_{p1} (\mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1) = \begin{bmatrix} c\phi_1 \\ s\phi_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ s\phi_1 P_{x1} \end{bmatrix} u_1 = \begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{y1} P_{x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & P_{x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \end{bmatrix}$$

2. Choix d'un propulseur vectoriel pour couvrir pilonnement et embardée :

Implantation dans R_b :

- Poussée : $\mathbf{u}_{p2} = [0 \ u_{y2} \ u_{z2}]^t$
- Position : $\mathbf{P}_2 = [0, 0, P_{z2}]^t$;
- Matrice de rotation : ${}^b\mathbf{R}_{p2} = \text{Rotation}(\mathbf{y}_b, -\pi/2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Le torseur du propulseur P_2 dans R_b est :

$$\tau_2 = {}^b\mathbf{R}_{p2} (\mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ s\phi_2 \\ c\phi_2 \\ -P_{z2}s\phi_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{y2} \\ u_{z2} \\ -P_{z2}u_{y2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -P_{z2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{y2} \\ u_{z2} \end{bmatrix}$$

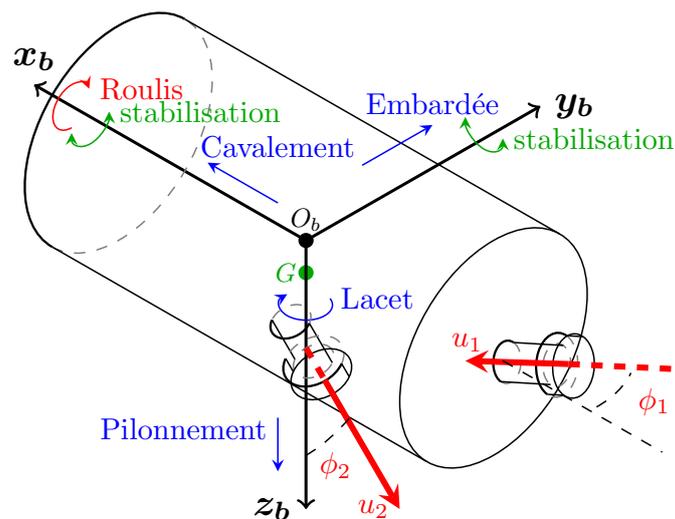


FIGURE 5 : Robot RSM-VEC-2D2

La combinaison des 2 propulseurs vectoriels donne le torseur total de propulsion dans R_b :

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{vec}} = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2 = \begin{bmatrix} c\phi_1 & 0 \\ s\phi_1 & s\phi_2 \\ 0 & c\phi_2 \\ 0 & -P_{z2}s\phi_2 \\ 0 & 0 \\ s\phi_1 P_{x1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -P_{z2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{x1} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{\text{vec}}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{y2} \\ u_{z2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_{\text{vec}}} \quad (17)$$

En accord avec l'analyse faite dans [4], il est facile de vérifier que $\text{span}\{\boldsymbol{\tau}_{\text{vec}}\} \subset \text{Im } \mathbf{B}_{\text{vec}}$ et donc le système de propulsion réalise la tâche demandée $\boldsymbol{\tau}_a = [* * * 0 0 *]^t$. Une fois l'équation (17) résolue, il est possible à partir de \mathbf{u}_{vec} d'extraire les commandes des propulseurs vectoriels à l'aide de l'équation (7) :

$$\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{u_{x1}^2 + u_{y1}^2} \\ \phi_1 &= \arctan 2(u_{y1}, u_{x1}) \\ u_2 &= \sqrt{u_{y2}^2 + u_{z2}^2} \\ \phi_2 &= \arctan 2(u_{y2}, u_{z2}) \end{aligned} \quad (18)$$

4 Conclusion

Ce travail généralise aux propulseurs vectoriels le formalisme de représentation et de conception des systèmes de propulsion de robots sous-marins. Nous avons montré que la tâche de référence à 4DDL pouvait être également réalisé par un AUV muni de deux propulseurs vectoriels à un angle de reconfiguration. Le principe de la démarche est de décomposer les propulseurs vectoriels en combinaisons de propulseurs fixes, ce qui permet ramener l'analyse de commandabilité des AUV à propulseur vectoriel à celle des AUV à propulseurs fixes [4]. Les outils développés ici permettent d'entrevoir une procédure systématique de conception d'AUV à propulsion généralisée (fixe ou vectorielle) à partir de la tâche.

Références

- [1] G. Antonelli. *Underwater Robots : Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*. Springer-Verlag, New York, NJ, 2006.
- [2] A. Bourré, S. Lmai, C. Laot, and S. Houcke. A robust ofdm modem for underwater acoustic communications. In *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, pages 1–5, June 2013.
- [3] E. Cavallo, R. C. Michelini, and V. F. Filaretov. Conceptual design of an auv equipped with a three degrees of freedom vectored thruster. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, 39(4) :365–391, 2004.
- [4] O. Chocron and E. Delaleau. Trajectory-based synthesis of propulsion systems for fixed-thrusters auv. In *ROMANSY 2018, 22nd CISM IFTOMMSymposium on Robot Design, Dynamics and Control*, volume 584, pages 380–391, July 2018.
- [5] O. Chocron and H. Mangel. Reconfigurable magnetic-coupling thrusters for agile auvs. In *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pages 3172–3177, Nice, France, 2008.

- [6] O. Chocron, U. Prieur, and L. Pino. A validated feasibility prototype for auv reconfigurable magnetic coupling thruster. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 19(2) :642–650, 2014.
- [7] O. Chocron, E. P. Vega, and Mohamed E. H. Benbouzid. Evolutionary dynamic reconfiguration of auvs for underwater maintenance. In L. et al. Jaulin, editor, *Marine Robotics and Applications*, volume 10 of *Ocean Engineering & Oceanography*, pages 137–178. Springer, Cham, 2018.
- [8] Olivier Chocron, Emanuel P. Vega, and Mohamed Benbouzid. Dynamic reconfiguration of autonomous underwater vehicles propulsion system using genetic optimization. *Ocean Engineering*, 156 :564 – 579, 2018.
- [9] T. I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, New York, 1994.
- [10] V. Hagenmeyer and E. Delaleau. Exact feedforward linearization based on differential flatness. *International J. Control*, 76(6) :537–556, 2003.
- [11] Wisama Khalil, Guillaume Gallot, and Frédéric Boyer. Dynamic modeling and simulation of a 3-d serial eel-like robot. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C (Applications Rev.)*, 37(6) :1259–1268, 2007.
- [12] Vladislav Kopman, Nicholas Cavaliere, and Maurizio Porfiri. Masuv-1 : A miniature underwater vehicle with multidirectional thrust vectoring for safe animal interactions. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 17(3) :563–571, 2012.
- [13] Y.G. G. Le Page, K.W. W. Holappa, and Le Page. Hydrodynamics of an autonomous underwater vehicle equipped with a vectored thruster. In *Ocean. 2000 MTS/IEEE Conf. Exhib. Conf. Proc.*, volume 3, pages 2129–2134. IEEE, 2000.
- [14] Xichuan Lin and Shuxiang Guo. Development of a spherical underwater robot equipped with multiple vectored water-jet-based thrusters. *J. Intell. Robot. Syst.*, 67(3-4) :307–321, 2012.
- [15] Yutaka Nagashima, N Taguchi, and Takakazu Ishimatsu. Development of a compact hybrid underwater vehicle using variable vector propeller. In *Proc. 23rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr.*, pages 66–71, 2006.
- [16] Michael T. Nawrot. *Conceptual design of a thrust-vectoring tailcone for underwater robotics*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2012.
- [17] Alistair Robin Palmer. *Analysis of the Propulsion and Manoeuvring Characteristics of Survey-Style AUVs and the Development of a Multi-Purpose AUV*. PhD thesis, School of Engineering Sciences, Faculty of Engineering, Science & Mathematics, University of Southampton, UK, 2009.
- [18] L. Pino and E. Delaleau. Flatness-based computer-aided design of mechanical systems. In *Prepr. 13th IFAC Workshop on Control Applications of Optimisation (CAO'06)*, Cachan, France, 2006.
- [19] James Allen Schultz. Autonomous underwater vehicle (AUV) propulsion system analysis and optimization. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [20] D. Shea, C. Williams, M. He, P. Crocker, N. Riggs, and R. Bachmayer. Design and testing of the marport SQX-500 twin-pod auv. In *2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, pages 1–9, 2010.

- [21] Liu Sheng, Ren Dong, Li Bing, and Chang Xucheng. Research on variable direction rotatable axis variable vector propeller of auv in vertical motion. In *Int. Forum Inf. Technol. Appl.*, volume 3, pages 267–270. IEEE, 2010.
- [22] Leo V. Steenson, Alexander B. Phillips, Eric Rogers, Maaten E. Furlong, and Stephen R. Turnock. Control of an AUV from thruster actuated hover to control surface actuated flight. Technical Report RTO-MP-AVT-189, NATO, 2011.
- [23] Ngoc-huy Tran, Myung-Man Woo, Hyeung-sik Choi, and Joon-Young Kim. Development of a new underwater disk robot. In *2012 Ocean. - Yeosu*, pages 1–9. IEEE, 2012.
- [24] Emanuel Pablo Vega, Olivier Chocron, and Mohamed E. H. Benbouzid. A flat design and validated model for auv reconfigurable magnetic coupling thruster. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, pages 2892–2901, 2016.
- [25] Emanuel Pablo Vega, Olivier Chocron, Janito Vaqueiro Ferreira, Mohamed E. H. Benbouzid, and Pablo Siqueira Meirelles. Evaluation of auv fixed and vectorial propulsion systems with dynamic simulation and non-linear control. In *IECON 2015 - 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pages 944–949. IEEE, 2015.
- [26] Karstein Vestgard, Roar Hansen, Bjorn Jalving, and Odd Arild Pedersen. The HUGIN 3000 survey AUV. In *Eleven Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, pages 679–684, Stavanger, Norway, 2001.
- [27] JA Wasylyszyn. Active control of underwater propulsor using shape memory alloys, 2005.
- [28] Junzhi Yu, Yonghui Hu, Ruifeng Fan, Long Wang, and Jiyan Huo. Construction and control of biomimetic robotic dolphin. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, pages 2311–2316, 2006.
- [29] Chunlin Zhou and K. H. Low. Design and locomotion control of a biomimetic underwater vehicle with fin propulsion. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 17(1) :25–35, 2012.