

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTRONIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNIQUES

Filière : AUTOMATIQUE

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Prototype d'un robot poisson :
Conception et réalisation**

Présenté par : *SOUAHI Meriem*

Encadrant : *BENMOUSSA Samir*

MCA

UBMA

Jury de Soutenance :

GHERBI Soufiane	Pr.	UBMA	Président
BENMOUSSA Samir	MCA.	UBMA	Encadrant
CHAKER Karima	MCB.	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

ملخص

في هذا المشروع ، كنا مهتمين بتحقيق نموذج أولي لروبوت سمكي. يتكون هذا المشروع من جزأين ، الجزء الأول يتكون من إعداد النموذج الافتراضي في ظل بيئة صوليدوركس التي تم إنشاء نموذج حقيقي منها وذلك بفضل الطباعة ثلاثية الأبعاد. يتكون الجزء الثاني من التحقق من صحة قانون التحكم المستوحى من الحركة الميكانيكية الحيوية للأسماك. بمجرد التحقق من صحته ، تم تنفيذ هذا الأمر على لوحة تطوير وتم تضمينه في النموذج من أجل بعت الحياة إليه.

RESUME :

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à la réalisation d'un prototype d'un robot poisson. Ce projet est composé de deux parties, la première partie consiste à la préparation de la maquette virtuelle sous l'environnement SolidWorks à partir de laquelle une maquette réelle a été réalisée et ceci grâce à une impression 3D. La deuxième partie consiste à une validation d'une loi de commande inspirée de mouvement biomécanique des poissons. Une fois validée, cette commande a été implémentée sur une carte de développement STM32 et embarquée sur la maquette afin de lui donner vie.

ABSTRACT :

In this project, we were interested in the realization of a prototype of a fish robot. This project is composed of two parts, the first part consists in the preparation of the virtual model under the SolidWorks environment from which a real model was made and this thanks to a 3D printing. The second part consists of a validation of a control law inspired by the biomechanical movement of fish. Once validated, this command was implemented on an STM32 development board and embedded on the model in order to bring life to it.

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le miséricordieux de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce projet de fin d'études.

Je remercie chaleureusement mon encadrant, Monsieur BENMOUSSA Samir, pour sa confiance, ses encouragements et de son soutiens. Tous les mots de remerciements ne suffisent pas ! Que ALLAH le protège, et lui garde sa famille

Mes remerciements vont aussi plus particulièrement aux membres du jury, Monsieur GHERBI Sofiane et Madame CHAKER Karima, pour leur générosité et la grande patience, malgré leurs charges académiques et professionnelle.

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la rédaction de ce document

Mes remerciements s'adresse aussi à l'équipe de complexe sidérurgique SIDER EL HADJAR, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils m'ont fait vivre durant ma période de stage

Je remercie mes cousines KHAOULA & INES et ma meilleure amie ASMA.

MERIEM

Je dédie ce modeste travail

à la mémoire de mon papa *SOUAHI Ahmed,*

« J'aurai souhaité ta présence en ce moment pour partager ma joie, tu m'as toujours fait preuve d'amour et d'affection, tu es toujours là dans mon esprit et dans mon cœur. Aussi dans ce moment de joie. Que ton âme repose en paix. »

A mon adorable maman *BOUGHAMBOUZ Badra*

« Tu es la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, a la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences, qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse »

Table des matières

1	Les robots poissons	7
1.1	Historique et évolution des véhicules sous-marins	7
1.2	Domaines d'application	8
1.2.1	Militaire	8
1.2.2	Civile	8
1.3	Etat de l'art sur les robots poisson	10
1.4	Types de commande	12
1.5	Conclusion	12
2	Génération de mouvement et commande	13
2.1	Introduction	13
2.2	Modélisation des robots poissons	13
2.2.1	Transformation des vitesses de translation et de rotation	17
2.3	Le réseau de modele central CPG	18
2.3.1	Generation de mouvement	21
2.4	Conclusion	23
3	Réalisation du prototype et résultat	24
3.1	Introduction	24
3.2	Cahier des charges	24
3.3	CAO du robot poisson	24
3.3.1	Maquette virtuelle	24
3.3.2	Contraintes et assemblage	25
3.3.3	Maquette réelle	26
3.4	Implementation de CPG sur MATLAB simulink	28
3.5	Simscape Multibody	28
3.5.1	Exportation du modèle vers Simscape Multibody	29
3.6	Déploiement du code C sur STM32	29
3.7	Spécifications techniques du robot poisson	31
3.7.1	Moteurs	31
3.7.2	Carte de developpement STM32	33

3.7.3	The MPU9250 sensor	35
3.8	Conclusion	36

Table des figures

1.1	L'USS Nautilus	8
1.2	Sous-marin militaire	9
1.3	Le robot poisson iSplash-II	9
1.4	Developpement de iSplash-II	10
1.5	Le robot poisson BIKI	11
2.1	Les variables de mouvements d'un robot poisson	14
2.2	Mouvement du lacet.	15
2.3	Mouvement du tangage	16
2.4	Mouvement du roulis	16
2.5	Couplage des oscilateurs et commande du robot	20
2.6	Equations de commande pour la premiere articulation	20
2.7	Equation de commande pour la deuxieme articulation	20
2.8	Configurations de nageoires pour un mouvent vers le haut/le bas.	22
2.9	Configuration de nageoires pour un mouvement de roulement.	22
2.10	Architecture de la commande adoptée pour la propulsion du robot poisson.	23
3.1	Le prototype du robot poisson.	25
3.2	quelques pièces sous l'environnement Solidwork	26
3.3	Suite : quelques pièces sous l'environnement Solidworks	26
3.4	CAO modèle	27
3.5	Maquette réelle de notre robot.	27
3.6	Implemtation des equations φ_1 et φ_2 sur MATLAB simulink	28
3.7	x_1 et x_2	29
3.8	x_3 et x_4	29
3.9	La réponse du modèle CPG à une consigne variable.	30
3.10	MG90S servomoteur	31
3.11	Periode PWM de MG90S	32
3.12	MG996R servomoteur	33
3.13	Vue de face de la carte STM32.	35
3.14	Vue de dessous de la carte STM32.	35

Introduction Générale

L'eau couvre les 2/3 de la surface de la planète, mais la découverte du monde aquatique est dangereuse pour l'homme en raison des profondeurs infinies et intrigantes. Le trou sous-marin le plus profond actuellement connu est la fosse des Mariannes, située dans la partie nord-ouest du Pacifique, océan non loin du Japon. Le point le plus bas de ce trou est situé à environ 11 000 m. Son exploration est une tâche difficile en raison de la complexité et de la nature du milieu sous-marin, les scientifiques et les chercheurs attendent à développer la possibilité d'inspection et d'exploration des grands fonds marins en créant des drones sous-marins autonomes afin de simplifier les problèmes scientifiques et techniques dus à la nature sous-marine et à sa dangerosité. Cette recherche minutieuse dépend d'une étude approfondie et d'une conception spécifique et appropriée pour s'adapter au milieu, elle comprend : le mouvement, système de contrôle, la spécification des actionneurs. Les véhicules sous-marins ont été énormément utilisés dans la détection à la destruction de mines, de recherche et sauvetage et de recueillir des données de communication sous-marine, la recherche bio marine. Ces engins sont classés en types comme suit :

- Les ROV sont l'un des drones sous-marins les plus populaires, ils sont attachés à des ombilicaux et actionnés à distance depuis la surface par des pilotes pour remplacer les plongeurs à de grandes profondeurs ou dans des environnements à haut risque. Son rôle principal est d'intervenir dans des opérations qui nécessitent des opérations profondément complexes.
- Un autre type de drone sous-marin est un AUV, un véhicule sous-marin autonome, décrit comme un véhicule pouvant nager librement sur de longues distances. Ce genre de véhicules sont capables d'effectuer des tâches sans intervention humaine et a des avantages par rapport au ROV qui augmente sa plage de fonctionnement, le rôle principal de l'AUV est d'inspecter et de mesurer les fonds marins.
- Le robot poisson, qui est considéré comme très efficace. Son rôle n'est

pas très différent des modèles mentionnés précédemment, ne différant que par la taille et certaines caractéristiques techniques, ce dernier peut entrer entre les poissons et adopter leur mouvement naturel tout en exécutant les commandes, et c'est ce que ce projet abordera, qui comprend la réalisation d'un prototype d'un robot poisson appelé BIANCA.

Ce mémoire est structuré comme suit :

1. Dans le premier chapitre, nous donnons une classification et un état de l'art des robots poissons avec leurs domaines d'application et les types de commandes.
2. deuxième chapitre traite la modélisation ainsi que la propulsion et la génération de mouvement.
3. le troisième et le dernier chapitre présente la réalisation matérielle et logiciel du robot poisson.

Chapitre 1

Les robots poissons

1.1 Historique et évolution des véhicules sous-marins

D'après notre Saint CORAN, le prophète Noh fut le premier qui a inventé sous le guide d'Allah un moyen de transport maritime et ceci lors du premier déluge. Et depuis, les humains utilisent des bateaux comme un moyen de transport. L'idée une machine sous-marine est probablement fut l'idée d'Aristote ; selon la légende : *skaphe andros* fut la machine qui a permet à Alexandre le Grand (Alexandre III de Macédoine, 356-323 av. J.-C.) de rester submergé pendant au moins une demi-journée durant le siège de Tyr en 332 av J.C. Léonard de Vinci est peut-être été le premier à concevoir un véhicule sous-marin. Ses efforts sont enregistrés dans Codex Atlanticus, écrit en 1480 et 1518. La légende raconte que Léonard eu l'idée d'une machine militaire sous-marine, mais il a laissé tomber son projet car il pensait qu'il était trop dangereux.

En 1904, l'ingénieur français Maxime Laubeuf a construit un naval avec un périscope et un ballast externe, qui a été approuvé par la Marine à l'époque. De 1914 à 1918, un submersible à propulsion diesel électrique fut inventé pour être utilisé en grande quantité pendant la première guerre mondiale. A partir des années 1950, la propulsion nucléaire commence à être montée sur les sous-marins (l'USS Nautilus (SSN571) de 1954 (Figure 1.1).

Dès leurs origines, et à la fin du 19ème siècle, le terme sous-marin a été utilisé pour décrire un navire pouvant être submergé en profondeur, avec une certaine portée, et une vitesse faible. Si les performances s'améliorent peu à peu, ce n'est qu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, notamment grâce à perfectionnement des snorkelers et progrès des ingénieurs allemands dans le domaine de la propulsion électrique des sous-marins.



FIGURE 1.1 – L’USS Nautilus

1.2 Domaines d’application

Les véhicules sous-marins ont un large éventail d’utilisations potentielles qui touchent deux grands secteurs en particulier [3] :

1.2.1 Militaire

L’une des applications militaires les plus utilisées comprend la détection et la recherches sous-marines. Aussi, pour empêcher l’invasion de plongeurs et de véhicules sous-marins ennemis. Les ports permettent aux robots autonomes de faire fonctionner dans les zones proches de l’entrée du port. Généralement, l’utilisation militaire est représentée par les quelques tâches suivantes :

- Carte détaillée de l’espion.
- Détection et identification des mines terrestres sous-marines.
- Détection et identification de navires, navires et sous-marins.
- Protéger le port militaire et l’environnement portuaire.
- Ecoute sonar passive et active (analyse du bruit généré par chaque cible et analyse du coefficient de réflectance du son).

1.2.2 Civile

Les compagnies pétrolières, gazières et de télécommunications seront bientôt intéressées par les potentialités des véhicules sous-marins. Leurs besoins s’expriment en termes de géodésie des actifs marins, de la pique à la pose de pipelines ou de câbles et l’entretien de ces structures. Parmi les applications, nous pouvons citer :

- Une meilleure érudition du bain navigateur local.
- Une pistage indéfrisable du type navigateur tout alentour des plateformes pétrolières (capteur d’hydrocarbures).



FIGURE 1.2 – Sous-marin militaire

- Une visite virtuelle d'un site protégé.
- Étude marine et océanique.



FIGURE 1.3 – Le robot poisson iSplash-II

Autre applications des robots sous-marins, c'est la protection de l'environnement : restrictions de pêche et protection du milieu marin, détection, identification. Ces robots sont aussi utiles pour l'aide à l'identification de la contamination intentionnelle (dégazage). Un véhicule sous-marin équipé d'un capteur biochimique peut détecter des contaminants. Par conséquent, il est possible d'identifier la personne responsable par comparaison chimique.

1.3 Etat de l'art sur les robots poisson

Nous allons présenter dans cette partie quelques exemples de robots poissons déjà réalisés, qui diffèrent dans les performances l'un à l'autre.

iSplash-II

C'est robot poisson ou drone subaquatique a 3ddl (Figure 1.3). Fut fabriqué en 2014, capable de surpasser les vrais poissons carangiformes en termes de vitesse maximale moyenne (mesurée en longueurs corporelles/seconde) et d'endurance, la durée pendant laquelle la vitesse maximale est maintenue.

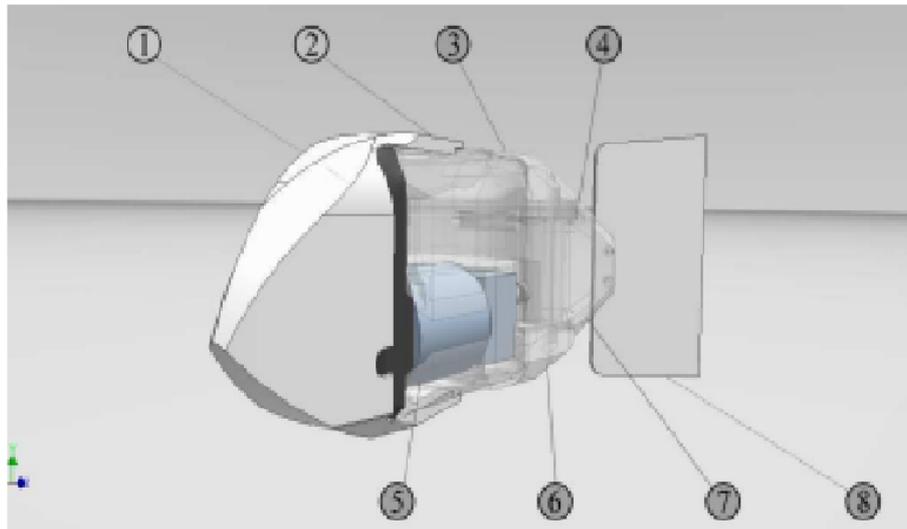


FIGURE 1.4 – Développement de iSplash-II

1. Articulation antérieur
2. Lines de transition du milieu du corps
3. Première articulation postérieure
4. Axe postérieur final
5. Actionneur primaire
6. Manivelle déportée à entraînement direct
7. Pédoncule entraîné par le tendon
8. Nageoire caudale

PARAMETRE	VALEUR SPECIFIQUE
Taille du corps :m(L*I*H)	0.32x0.048x0.112
Masse corporelle :kg	0.835
Actionneur :	Moteur electrique unique
Masse de l'actionneur :kg	0.63
Source de courant :	Batterie LIPO
Technique de fabrication :	impression 3D
Materiaux :	Filament PLA,Acetal, Inox
Mode de natation principal :	Locomotion lineaire
Maniabilite supplementaire :	Plan vertical
Surfaces de controle supplementaires :	Nageoires pectorales
Materiau de la nageoire caudale	Polypropylene
Epaisseur de la nageoire caudale :mm	2.3
Rapport d'aspect de la nageoire caudale : AR	1.6

Biki

Biki est un petit drone robotique en forme de poisson qui opère sous l'eau (Figure1.5). Sans fil, il fonctionne via WiFi et permet de prendre des photos et des vidéos sous l'eau et de se déplacer dans un silence extrême. Intelligent, il peut regagner sa base à la fin de son autonomie. Il est aussi connecté en installant l'application RoboSea dédiée sur smartphone.



FIGURE 1.5 – Le robot poisson BIKI

Nom du produit	Bionics-Robofish.
Numéro de modèle	BIKIV1.0.
Poids	1.2kg.
Caméra	1600 W-pixels /4K.
Profondeur maximale	a moins de 60m.

1.4 Types de commande

Il existe trois principaux types de commandes de véhicule sous-marins [3] :

1. Commande classique : telle que la commande Proportionnel-Intégrale-Dérivée (PID). Cette commande est utilisée pour les systèmes linéaires, basée sur l'identification de la fonction de transfert de la dynamique du système à contrôler.
2. Commande adaptative par retour d'état : est une technique de commande utilisée quand les paramètres du système sont inconnus ou varient dans le temps : le système doit agir à tout instant dans le sens désiré (minimisation de l'erreur entre la consigne et la sortie).
3. Commande par mode glissant : est une technique de commande caractérisée par sa robustesse vis à vis des incertitudes paramétriques et non paramétriques. Le principe consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre.

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur les développements des véhicules sous-marins à la présentation de deux robots poissons. Nous allons présenter dans le chapitre suivant l'aspect mathématique nécessaire pour la commande de ce genre de robot.

Chapitre 2

Génération de mouvement et commande

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la génération de mouvement du robot poisson. La technique utilisée est inspirée de la locomotion du poisson.

2.2 Modélisation des robots poissons

La modélisation nécessite l'étape de définir des référentiels par rapport auxquels on décrira l'évolution du robot. Pour établir les équations décrivant le mouvement d'un robot poisson dans l'espace euclidien à trois dimensions, on utilise deux repères [3].

Le premier est le repère inertiel de référence $R_0 = (O, X_0, Y_0, Z_0)$. Ce repère R_0 étant lié à la terre, sera considéré comme Galiléen (figure 2.1). Son origine O sera choisie arbitrairement et pourra être par exemple la position initiale du robot.

Ensuite un repère local R_v , ayant comme origine le centre de flottabilité (ou de gravité) et est défini comme suit :

$$R_v = (C, X_v, Y_v, Z_v) \quad (2.1)$$

Appelé aussi repère mobile (voir figure 2.1) dont les axes sont choisis de la manière suivante :

- X_v l'axe longitudinal,
- Y_v l'axe transversal,
- Z_v l'axe normal au plan (X_v, Y_v)

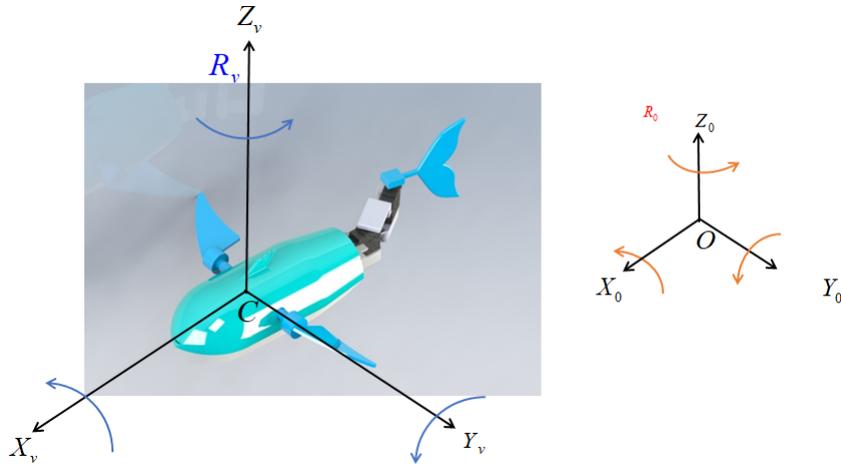


FIGURE 2.1 – Les variables de mouvements d’un robot poisson

Une fois les repères ont été fixés, nous passons à la modélisation.

modele cinématique

Le mouvement de la machine est décrit par les paramètres suivants :

$$\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$$

Où η est un vecteur d’état représentant la position et la direction du véhicule par rapport au repère R_0 . Les coordonnées x , y et z indiquent la position de l’origine du R_v par rapport au repère R_0 . Les angles (θ, ϕ, ψ) sont les angles de Euler et représentent respectivement le roulis, le tangage et le lacet. Ce sont des angles directionnels.

Le vecteur vitesse v exprimé par l’Eq.2.2 est composé des vitesse linéaires et angulaires du référentielle R_v par rapport au repère R_0 .

$$V = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (2.2)$$

ou les vitesses u , v et w , mesurées en m/s , correspondent aux vitesses le long des axes x , y et z .

les matrices de transformation homogène

La configuration du robot est décrite par trois rotations de base définies par trois angles de direction : roulis Φ , tangage θ et lacet ψ .

$$B(X_0, Y_0, Z_0) \rightarrow^{H_\psi} B(X_1, Y_1, Z_0) \rightarrow^{H_\theta} B(X_v, Y_1, Z_1) \rightarrow^{H_\phi} B(X_v, Y_v, Z_v) \quad (2.3)$$

Où $B(X_0, Y_0, Z_0)$ est la base du repère global R_0 et $B(X_v, Y_v, Z_v)$ est la base du repère local R_v . $B(X_1, Y_1, Z_0)$ et $B(X_v, Y_1, Z_1)$ sont des bases intermédiaires, et H_ψ, H_θ et H_ϕ sont des matrices de rotation orthogonale.

La première rotation de lacet ψ par rapport à Z_0 dans le sens contraire du sens horaire (Counter Clockwise, CCW) est illustré par la Figure 2.2. La matrice de rotation est exprimée par :

$$H_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

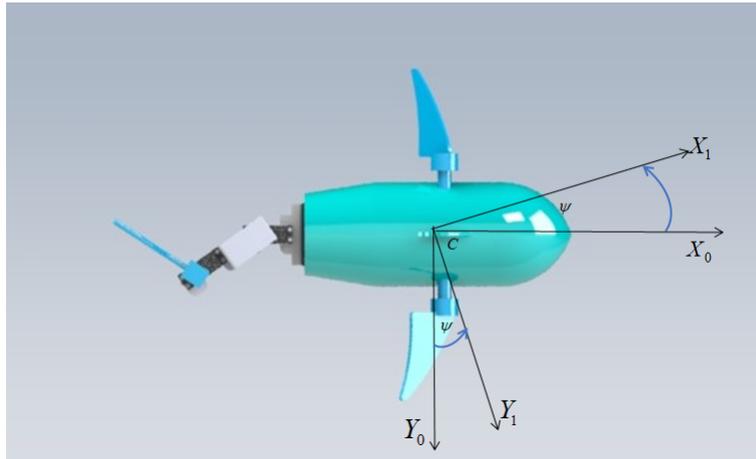


FIGURE 2.2 – Mouvement du lacet.

Le deuxième angle de rotation θ représente une rotation autour de l'axe Y_1 (voir Figure 2.3). La matrice de passage H_θ entre les bases $B(X_1, Y_1, Z_0)$ et $B(X_v, Y_1, Z_1)$ est donnée par :

$$H_\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

La troisième rotation qui est le roulis ϕ se produit autour de l'axe X_v du nouveau repère (voir Figure 2.4) est donnée par la matrice suivante :

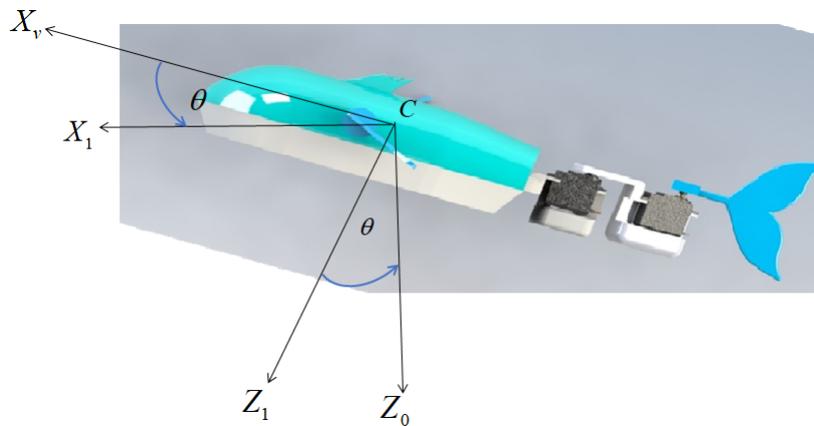


FIGURE 2.3 – Mouvement du tangage

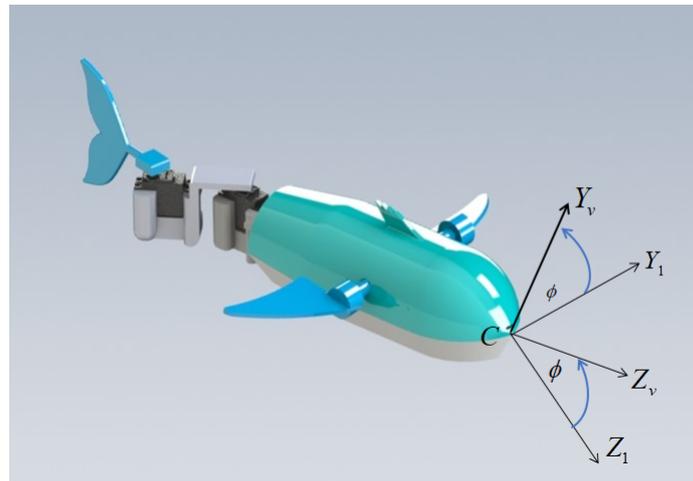


FIGURE 2.4 – Mouvement du roulis

$$H_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}$$

Par conséquent, le repère R_V ayant subi trois rotations successives est exprimée par rapport au repère de référence R_0 par la matrice suivante :

$$T_1 = H_\psi H_\theta H_\phi$$

donc :

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\cos(\psi)\sin(\theta) & \sin(\phi)\sin(\psi) + \sin(\theta)\cos(\psi)\cos(\phi) \\ \cos(\theta)\sin(\psi) & \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.1 Transformation des vitesses de translation et de rotation

En utilisant la matrice de transition de changement de base $T_1(\eta_2)$ la translation des composantes de vitesse de translation pour R_0 est donnée comme suit :

$$T_1(\eta_2)^T T_1(\eta_2) = T_1(\eta_2)T_1(\eta_2)^T = Id_3$$

Transformation des vitesses de translation et de rotation

En utilisant la matrice de transition de changement de base $T_1(\eta_2)$, la transformation de la composante de vitesse de translation pour R_0 est exprimée par :

$$\dot{\eta}_1 = T_1(\eta_2)v_1 \quad (2.5)$$

A partir de l'expression relationnelle 2.3, la vitesse de rotation locale peut s'exprimer comme suit :

$$v_2 = \dot{\psi}Z_0 + \dot{\theta}Y_1 + \dot{\phi}X_v \quad (2.6)$$

Alors la base de repère mobile $B(X_v, Y_v, Z_v)$ peut représenter le vecteur vitesse angulaire.

$$v_2 = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta) \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}\cos(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta) \\ \dot{\theta}\cos(\phi) + \dot{\psi}\sin(\phi)\cos(\theta) \\ \dot{\psi}\cos(\theta)\cos(\phi) - \dot{\theta}\sin(\phi) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

d'où :

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & -\sin(\theta) \\ a_{21} & \cos(\phi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ a_{31} & -\sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$T_2 = T_2(\eta_2)$ représente la matrice de transition reliant les composantes de la vitesse de rotation. Dans le système de coordonnées global et ceux liés au système de coordonnées local. C'est-à-dire :

$$T_2 = T_2(\eta_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

On distingue la deuxième relation cinématique :

$$\dot{\eta}_2 = T_2(\eta_2)v_2 \quad (2.10)$$

REMARQUE : Il convient de noter que la paramétrisation du pitch révèle la spécificité $\theta = \frac{\pi}{2} + k\pi$ du fait du phénomène de pression hydrostatique, ce paramétrage est inaccessible La mécanique des fluides et la propulsion rendent impossible pour un robot poisson d'avoir un angle d'inclinaison de 90° .

A l'aide des équations 2.5 et 2.10 la cinématique des robots poisson s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1(\eta_2) & 0_{3*3} \\ 0_{3*3} & T_2(\eta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{T(\eta_2)}$

2.3 Le réseau de modèle central CPG

Le contrôle de la locomotion est un sujet de recherche d'actualité au sein de la communauté robotique en raison de son caractère fondamental dans la recherche sur les robots mobiles. Les contrôleurs de locomotion conventionnels doivent modéliser la dynamique du robot, dans la plupart des cas, est trop compliqué à établir. De plus, des déficiences telles qu'une flexibilité, une adaptabilité et une stabilité limitées rendent ces approches basées sur des modèles incompetentes pour générer facilement une trajectoire lisse en ligne et répondre rapidement à un environnement inconnu. Par conséquent, de plus en plus de chercheurs se sont inspirés de la locomotion animale, qui a évolué pour être efficace, rapide, ajustable et fiable sous la pression de l'évolution.

Une classe de contrôleurs bio-inspirés prometteurs est le réseau locomoteur spinal (Central Pattern Network en anglais, Abrev. CPG) [5] qui consiste en des réseaux couplés capables de produire des modèles oscillatoires coordonnés d'activité rythmique tout en recevant des signaux de réglage simples de centres de

contrôle supérieurs.

Il est souhaitable que les contrôleurs CPG artificiels possèdent les mêmes propriétés intrinsèques de rythme, de coordination, de variété et de robustesse que les CPG naturels des animaux. Les contrôleurs CPG artificiels ont fait l'objet d'études approfondies et ont été appliqués à divers robots bio-inspirés, comme les robots bipèdes, ou quadrupèdes, des robots poissons, un robot salamandre et un robot serpent.

Elaboration du modèle CPG

Considérant que le robot poisson se propulse par un mouvement rythmique de droite à gauche de sa queue, le modèle basé sur CPG est bien adapté pour son contrôle de mouvement. Le modèle CPG appliqué est comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= 2\pi v_i + \sum_{j \in T(i)} w_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \phi_{ij}) \\ \ddot{r}_i &= a_i \left(\frac{a_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \\ x_i &= r_i (1 + \cos \theta_i)\end{aligned}\tag{2.12}$$

où θ_i et r_i représentent la phase et l'amplitude du i^{me} oscillateur, v_i et R_i sont la fréquence et l'amplitude naturelles, a_i est une constante, w_{ij} et ϕ_{ij} déterminent les poids et la phase du couplage entre les i^{me} et j^{me} oscillateurs biais. $T(i)$ est un ensemble d'oscillateurs dont le i^{me} oscillateur reçoit un couplage afférent. x_i est la sortie de temporisateur du i^{me} oscillateur. ϕ_i est l'angle de sortie du i^{me} servomoteur, et peut être obtenu par la formule suivante :

$$\phi_i = x_i - x_{2+i}\tag{2.13}$$

Le modèle CPG a un total de quatre oscillateurs comme il est illustré par la figure 2.5. Chaque articulation de la charnière polyvalente est équipée de deux oscillateurs pour générer un signal sinusoïdal modulé pour piloter le système de commande d'articulation (servomoteur). Le système de propulsion est à 2 dll, les oscillateurs gauches sont numérotés de 1 à 2 et les oscillateurs droits numérotés de 3 à 4.

La polarisation de phase entre les oscillateurs communs gauche et droit est fixée à π . C'est-à-dire qu'il oscille en phase opposée. Le biais de phase entre oscillateurs appartenant à des articulations différentes est fixé à $\pi/6$ pour les liaisons descendantes et à $-\pi/6$ pour les liaisons montantes. Ce paramètre représente le déphasage entre articulations adjacentes. Les figures 2.6 et 2.7 représente une l'implémentation du modèle CPG propre à notre robot poisson.

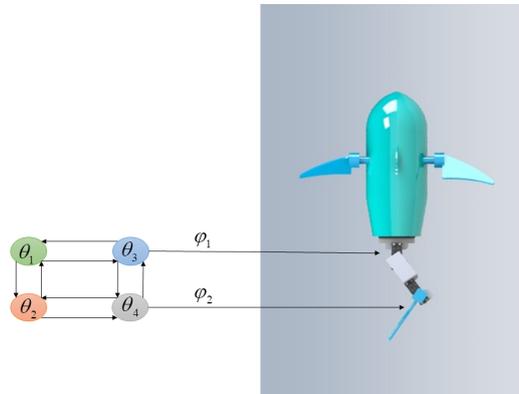


FIGURE 2.5 – Couplage des oscillateurs et commande du robot

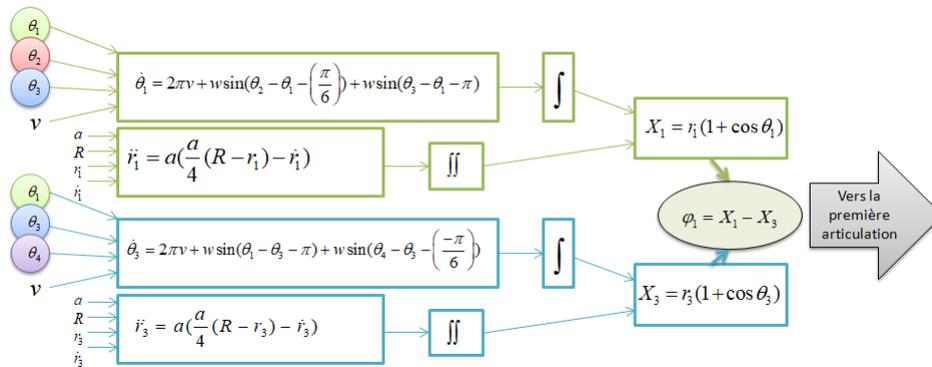


FIGURE 2.6 – Equations de commande pour la première articulation

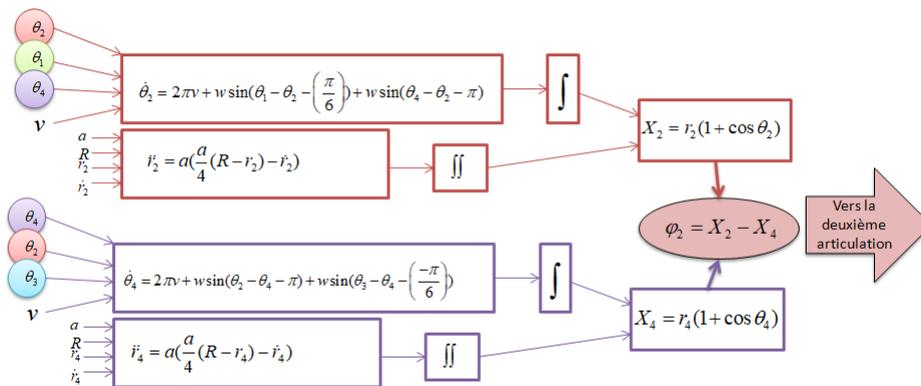


FIGURE 2.7 – Equation de commande pour la deuxième articulation

Le modèle CPG produit des signaux sinusoïdaux modulés en fréquence pour la commande des servomoteurs de chaque articulation. Ce modèle converge asymp-

totiquement vers l'Equation 2.14 [5].

$$\varphi_i^\infty(t) = (A_{L_i} - A_{R_i}) + (A_{L_i} + A_{R_i}) \cos(2\pi vt + i\Delta\phi + \phi_0) \quad (2.14)$$

où A_{L_i} et A_{R_i} sont les amplitudes intrinsèques des oscillateurs gauche et droit, ϕ_0 dépend de l'état initial des oscillateurs.

Comme on peut le constater à partir de l'équation 2.14, $(A_{L_i} - A_{R_i})$ représente le décalage et $(A_{L_i} + A_{R_i})$ représente l'amplitude de la i^{me} articulation.

En supposant que nous voulons définir le décalage et l'amplitude comme δ_i et A_i , nous devons définir $A_{L_i} = (A_i + \delta_i)/2$ et $A_{R_i} = (A_i - \delta_i)/2$. En bref, nous pouvons régler la fréquence, le décalage de phase, l'amplitude et le décalage du signal sinusoïdal pour contrôler l'angle du servomoteur en agissant sur v , $\Delta\phi$, A_i et δ_i .

2.3.1 Generation de mouvement

Avec ce modèle CPG, le robot poisson sera capable de nager vers l'avant avec la poussée de l'eau générée par l'ondulation rythmique des parties du corps. Cependant, pour contrôler le mouvement dans les trois directions, notamment le virage, le plongeon, la remontée à la surface, le roulement et la nage à reculons, les paramètres du modèle CPG doivent être modifiés et des nageoires pectorales doivent être utilisées.

D'une manière générale, la vitesse est modifiée en changeant la fréquence de l'onde corporelle, c'est-à-dire la fréquence intrinsèque v . Lorsqu'il s'agit du mouvement de rotation, on utilise le décalage δ_i .

Pour simplifier, nous fixons $\delta_i = \beta A_i$, où β est le rapport de décalage pour toutes les articulations. Si le robot poisson doit tourner à gauche, un β positif doit être adopté. Si le robot poisson doit tourner à droite, un β négatif doit être adopté. Lorsque le robot reçoit l'ordre de nager en ligne droite, β doit être fixé à 0.

Les mouvements de plongée, de remontée à la surface et de roulement exigent une certaine vitesse du robot poisson et l'aide des nageoires pectorales. En particulier, lorsque le robot poisson nage à une certaine vitesse avec ses nageoires pectorales dirigées vers le haut (comme représenté par la illustration gauche de la Figure 2.8), l'eau générera une force vers le bas sur les nageoires pectorales, ce qui fera nager le robot poisson vers le bas.

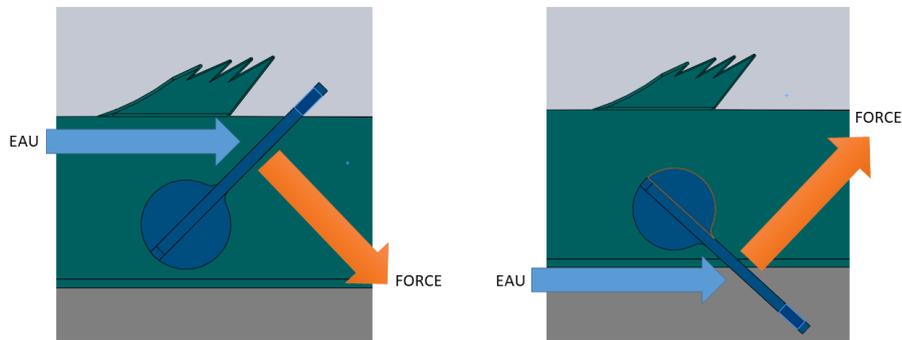


FIGURE 2.8 – Configurations de nageoires pour un mouvement vers le haut/le bas.

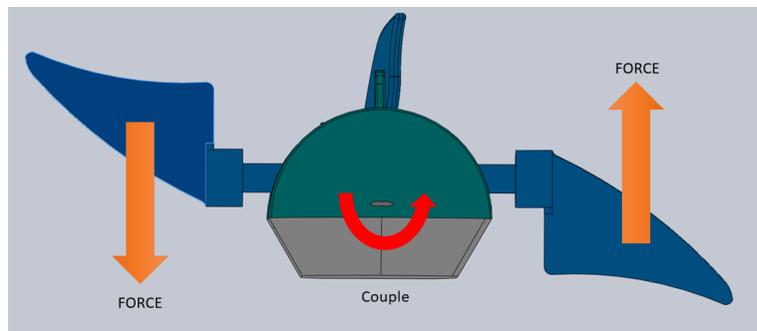


FIGURE 2.9 – Configuration de nageoires pour un mouvement de roulement.

Pour le mouvement de surf, l'angle des nageoires pectorales doit être orienté vers le bas comme illustré par le côté droit de la figure 2.8, ce qui génèrera une force vers le haut pour que le poisson nage vers le haut.

Avec une nageoire pectorale dirigée vers le bas et l'autre vers le haut (comme indiqué sur la figure 2.9), la force sur la nageoire pectorale produit un couple qui pousse le robot poisson à rouler le long de l'axe tête-queue, ce qui permet au robot poisson d'effectuer un mouvement de roulement. Quant au mouvement de nage en arrière, il suffit d'inverser le décalage de phase du modèle CPG pour générer une poussée en arrière pour la nage. Avec la capacité de nager en avant, de nager en arrière, de tourner, de plonger, de faire surface et de rouler, le robot poisson est capable d'atteindre n'importe quelle position avec n'importe quelle attitude.

En fin, la commande développée pour la commande du robot poisson est illustré par la figure 2.10 ou :

- ϕ_d, θ_d et ψ_d sont les angles générées par le generateur de mouvement,
- ϕ_1, ϕ_2 sont les angles de sorties de la CPG

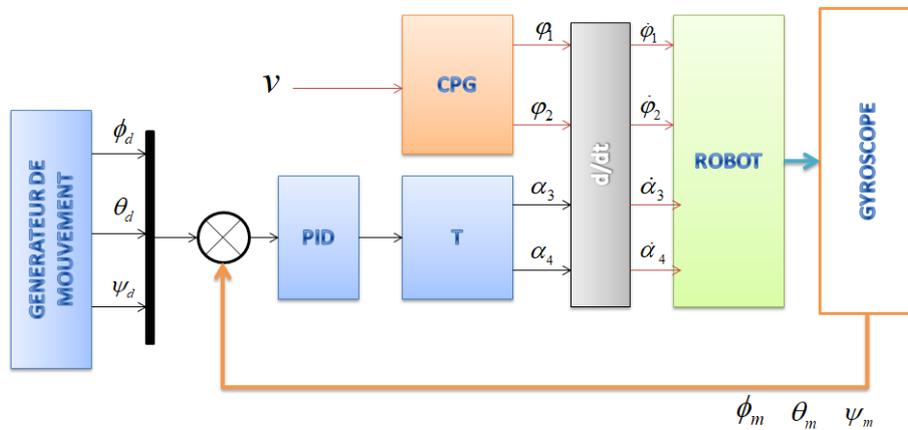


FIGURE 2.10 – Architecture de la commande adoptée pour la propulsion du robot poisson.

- α_3 et α_4 les angles de sorties par la matrice T,
- $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4$ sont les vitesses injectées dans les quatre articulations,
- ν la fréquence
- ϕ_m, θ_m et ψ_m sont les angles mesurés par le gyroscope.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du robot poisson ainsi que sa commande CPG. Nous allons présenter dans le prochain chapitre le prototype de notre robot poisson ainsi que l'implémentation de la commande CPG.

Chapitre 3

Réalisation du prototype et résultat

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la partie la plus importante de ce projet, qui est liée à la conception et à la réalisation de notre robot poisson " BIANCA". Nous allons aussi aborder l'implémentation de la loi de commande CPG.

3.2 Cahier des charges

L'objectif de ce projet est de concevoir un prototype d'un robot poisson a 4 degré de liberté basé sur 4 servomoteurs, une carte STM32F407 ainsi qu'un capteurs à 9 degrés de liberté (DOF) ; Ce dernier contient un magnétomètre à trois axes (X , Y , et Z), un accéléromètre à trois axes (X , Y , et Z), et un gyroscope à trois axes (X , Y , et Z) pour le contrôle du mouvement de roulis, tangage et lacet. Le traitement de données du gyroscope est traité par un programme développé en langage C de programmation du processeur ARM Cortex-M4 intégré sur le STM32 sous l'environnement de développement STM32CUBE IDE.

Le rendu final en réponse à ce cahier des charges est illustré par la figure 3.1. Pour cette fin, nous commençons d'abord par réaliser la maquette virtuelle sur un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

3.3 CAO du robot poisson

3.3.1 Maquette virtuelle

Le modèle géométrique du robot poisson a un double objectif. L'objectif initial est de permettre la simulation du modèle sous l'environnement MATLAB



FIGURE 3.1 – Le prototype du robot poisson.

grâce à la fonction Simscape, tout en tenant compte de la dynamique du robot. Le deuxième objectif est de créer une véritable réplique du robot grâce à l'impression 3D.

Le modèle virtuel du robot a été réalisé sous l'environnement SolidWorks version 2016 où le robot est composé des parties suivantes :

1. Une base principale du robot poisson.
2. Une base haute qui contient la carte stm32 et les servomoteurs.
3. Le coque.
4. Deux nageoires pectorales.
5. Une Nageoire caudale.
6. Deux servomoteur de type MG90S "extrait de GRABCAD".
7. Deux servomoteur de type MG996R "extrait de GRABCAD".
8. Deux supports pour les servomoteurs.

3.3.2 Contraintes et assemblage

Nous passons à leurs assemblages une fois que toutes les pièces ont été créées, en utilisant des contraintes de base de SolidWorks comme coaxial et Co-coïncidente. Cet assemblage permet de vérifier si les différents composants de la structure mécanique partagent les mêmes caractéristiques physiques. il permet aussi de réaliser des animations.

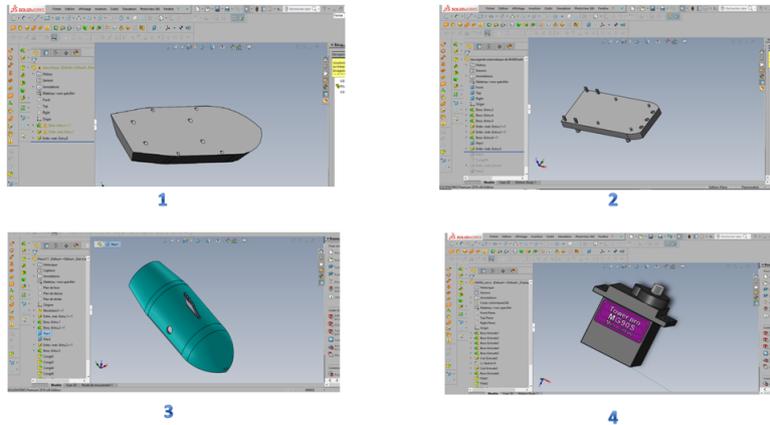


FIGURE 3.2 – quelques pièces sous l’environnement Solidwork

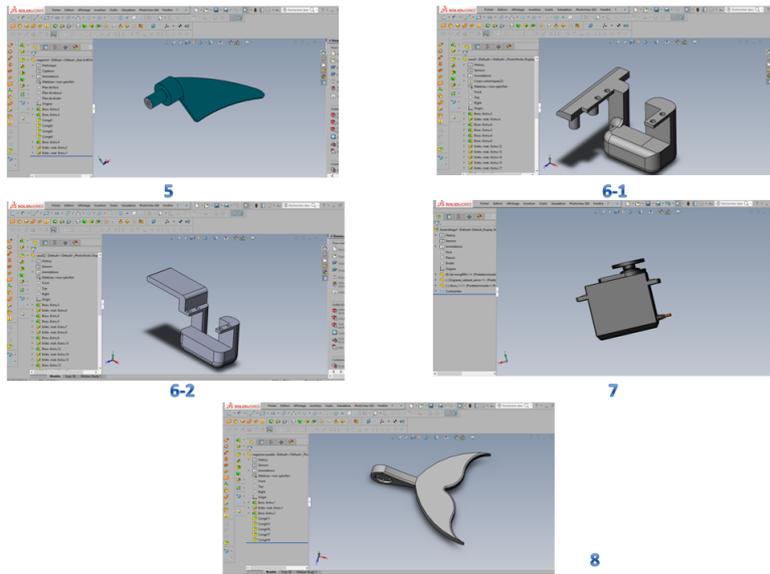


FIGURE 3.3 – Suite : quelques pièces sous l’environnement Solidworks

3.3.3 Maquette réelle

La maquette réelle du robot est obtenue à partir d’une impression 3D du CAO développé. L’évaluation numérique de la masse des pièces est une fonctionnalité essentielle de SolidWorks surtout lors du processus de conception, puisque ça nous permettra d’avoir une idée sur la masse de la maquette. Par exemple, pour une impression avec du PLA (acide polylactique) d’une masse de 1250 kg/m^3 , la base du robot est estimée à 289 g.

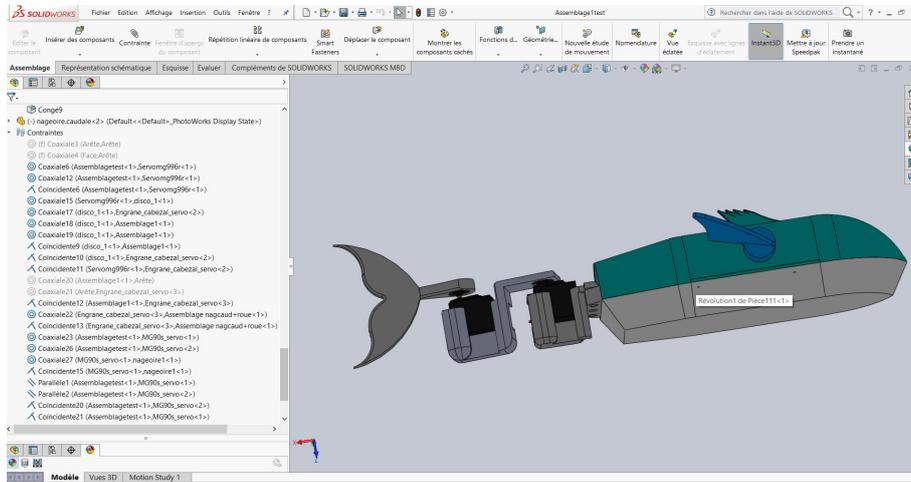


FIGURE 3.4 – CAO modèle



FIGURE 3.5 – Maquette réelle de notre robot.

3.4 Implementation de CPG sur MATLAB simulink

Suite à la conclusion de ce qui a été dit dans le deuxième chapitre, l'entrée de chaque articulation était connue. L'insertion des équations de sortie φ_1 et φ_2 représentées par la Figure 3.6 ont pour but d'obtenir un mouvement sinusoïdal.

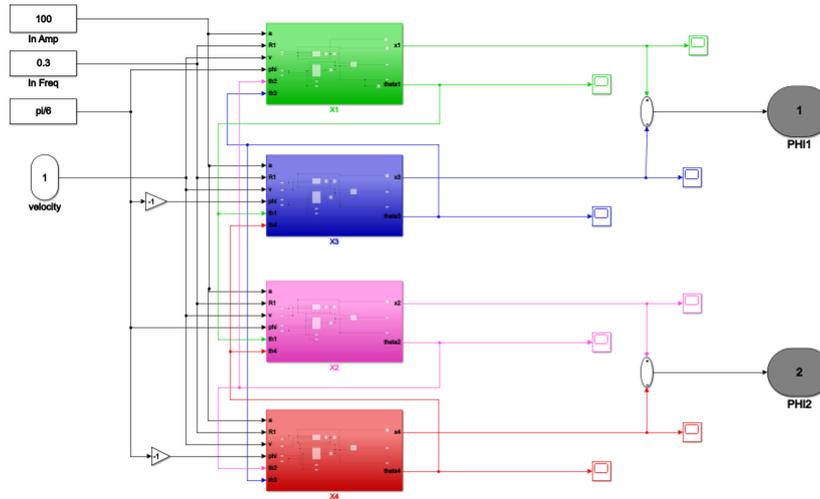
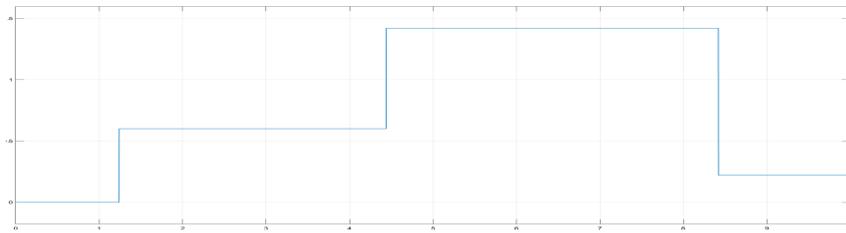


FIGURE 3.6 – Implémentation des équations φ_1 et φ_2 sur MATLAB simulink

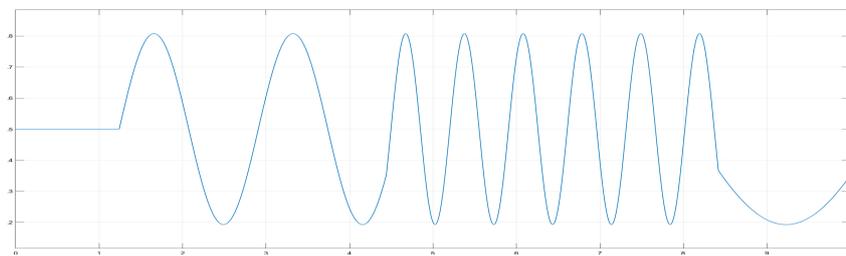
Pour écrire les systèmes d'équations 2.12 Commençons par x_i avec $i \in [1, 2, 3, 4]$ comme suit :

3.5 Simscape Multibody

Simscape Multibody™ (anciennement SimMechanics™) [4] fournit un environnement de simulation multicorps pour les systèmes mécaniques 3D, tels que les robots, les suspensions de véhicules, les équipements de construction et les trains d'atterrissage d'avions. Vous pouvez modéliser des systèmes multicorps à l'aide de blocs représentant des solides, des liaisons, des contraintes, des éléments de force et des capteurs. Simscape Multibody formule et résout les équations de mouvement pour l'ensemble du système mécanique. Vous pouvez importer dans votre modèle des assemblages de CAO complets, comprenant l'ensemble des masses, inerties, liaisons et contraintes, ainsi que la géométrie 3D. Une animation 3D déclenchée automatiquement vous permet de visualiser les dynamiques



(a): fréquence de consigne



(b): Réponse de la commande CPG

FIGURE 3.9 – La réponse du modèle CPG à une consigne variable.

- Spécifiez les entrées et sorties du contrôleur, comme illustré par la figure
- Sélectionnez démarrage rapide sur Embedded Coder.
- Sélectionnez le code C comme sortie du code généré.
- Sélectionnez le type de processeur de matériel cible approprié (Arm4 pour STM32F407)
- Sélectionnez l'objectif du code généré : efficacité d'exécution vs efficacité de la RAM.

Une fois tous les paramètres choisis correctement, un ensemble d'en-têtes et de codes c est généré. Ces fichiers sont ensuite intégrés sur STM32cube IDE sous les codes sources.

Un paramètre important à fixer avec soin est le temps d'échantillonnage. Dans ce projet, un temps d'échantillonnage de 0.01 sec est choisi. Ce choix est un compromis pour obtenir une efficacité d'exécution au sein de la carte stm32, et pour gérer différentes informations provenant du MPU9250

3.7 Spécifications techniques du robot poisson

3.7.1 Moteurs

Compte tenu de l'importance des moteurs et de la façon dont ils affectent les mouvements de poisson, le choix des moteurs est l'un des processus les plus cruciaux. Le système comporte quatre servomoteurs, dont deux analogiques MG90S et deux numériques MG996R, qui ont été choisis selon les caractéristiques suivantes :

MG90S

Le servo MG90S peut être pivoté d'environ 180 degrés (90 degrés dans chaque direction) [1], il fonctionne exactement de la même manière que les types standards, sauf qu'il est plus petit. Pour contrôler ces servos, n'importe quel code d'asservissement, matériel ou bibliothèque peut être utilisé.

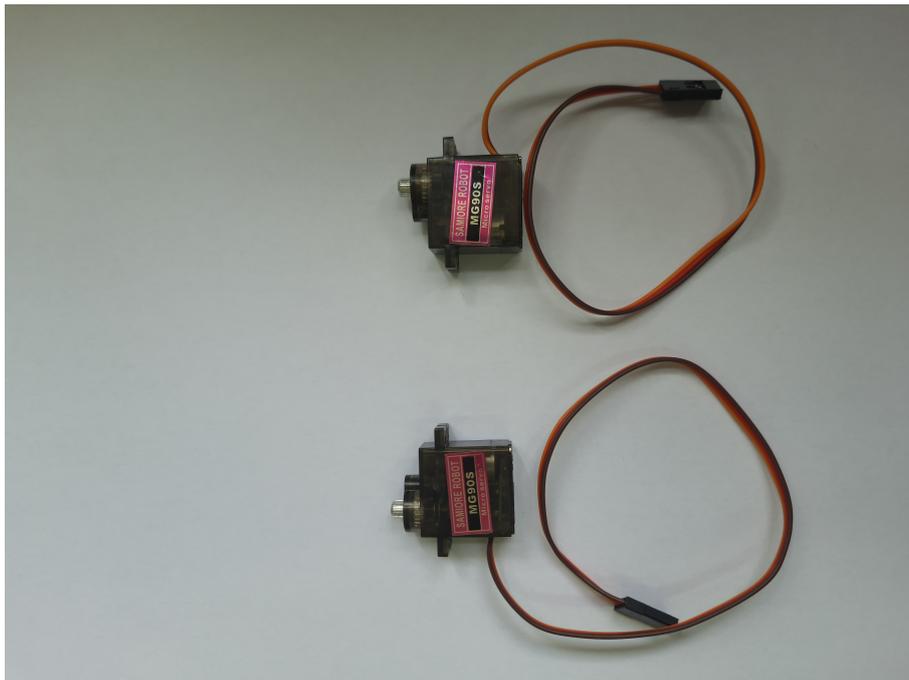


FIGURE 3.10 – MG90S servomoteur

les caractéristiques pour lesquelles ces moteurs qui contrôlent les nageoires pectorales ont été choisis sont :

- Poids : 13,4 g
- Dimension : 22,5 x 12 x 35,5
- Couple de décrochage : 1,8 kgf·cm (4,8 V)
- Vitesse de fonctionnement : 0,1 s/60 degrés
- Tension de fonctionnement : 4,8 V -
- Largeur de bande morte : 5 μ s

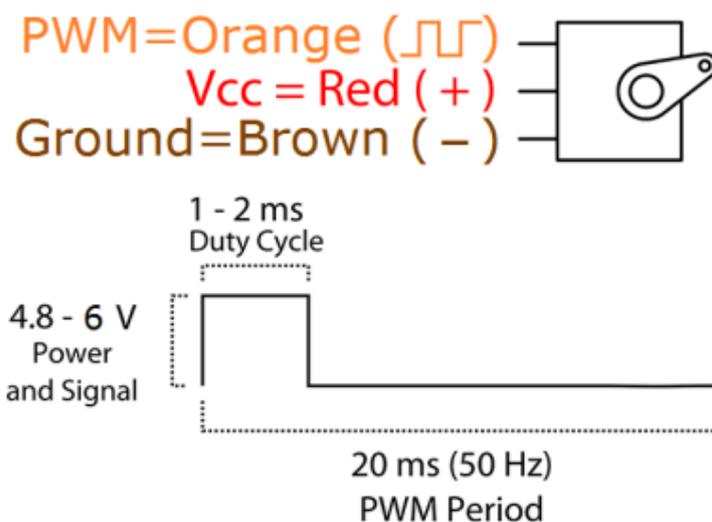


FIGURE 3.11 – Periode PWM de MG90S

MG996R

Ce servo numérique MG996R [2] à couple élevé est doté d'un engrenage en métal, ce qui se traduit par un couple de décrochage extra élevé de 10 kg dans un petit boîtier. Le MG996R est essentiellement une version améliorée du célèbre servo MG995, et dispose d'une meilleure résistance aux chocs et d'un système de contrôle PCB et IC repensé qui le rend beaucoup plus précis que son prédécesseur. L'engrenage et le moteur ont également été améliorés pour améliorer la bande morte et le centrage. L'unité est livrée avec un câble de 30 cm et un connecteur femelle de type S à 3 broches qui s'adapte à la plupart des récepteurs.

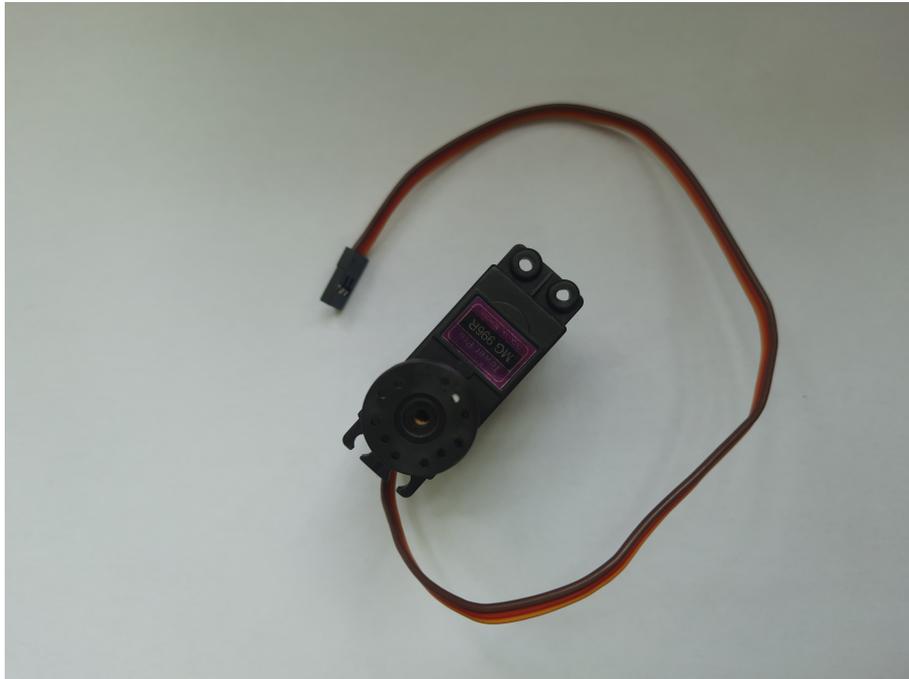


FIGURE 3.12 – MG996R servomoteur

les caractéristiques pour lesquelles ces moteurs ont été choisis sont :

Caractéristiques

- Poids : 55g
- Dimensions : 40,7 x 19,7 x 42,9 mm environ.
- Couple de décrochage : 9,4kgf·cm (4,8V), 11 kgf·cm (6V)
- Vitesse de fonctionnement : 0,17 s/60° (4,8 V), 0,14 s/60° (6 V) • Tension de fonctionnement : 4,8 V à 7,2 V
- Courant de fonctionnement 500 mA – 900mA (6v).
- Courant de décrochage 2,5A (6V)
- Largeur de bande morte : 5µs
- Conception stable et antichoc à double roulement à billes
- Plage de température : 0 °C – 55 °C 4,8 V à 7,2 V

3.7.2 Carte de developpement STM32

La famille STM32F407xx est basée sur le cœur RISC 32 bits Arm®Cortex®-M4 hautes performances fonctionnant à une fréquence pouvant atteindre 168 MHz. Le coeur Cortex-M4 comprend une unité à virgule flottante (FPU) simple préci-

sion qui prend en charge toutes les instructions de traitement de données et tous les types de données Arm à précision unique. Il implémente également un ensemble complet d'instructions DSP et une unité de protection de la mémoire (MPU) qui améliore la sécurité des applications.

La famille STM32F407xx intègre des mémoires embarquées à grande vitesse (mémoire Flash jusqu'à 1 Mo, jusqu'à 192 Ko de SRAM), jusqu'à 4 Ko de SRAM de sauvegarde et une vaste gamme d'E/S améliorées et de périphériques connectés à deux bus APB, trois Bus AHB et matrice de bus multi-AHB 32 bits. Tous les appareils offrent trois ADC 12 bits, deux DAC, un RTC basse consommation, douze temporisateurs 16 bits à usage général, dont deux temporisateurs PWM pour le contrôle du moteur, deux temporisateurs 32 bits à usage général. Un véritable générateur de nombres aléatoires (RNG).

Ils disposent également des interfaces de communication standard et avancées.

- Jusqu'à trois I2C
- Trois SPI, deux I2S full duplex. Pour obtenir une précision de classe audio, les périphériques I2S peuvent être cadencés via une PLL audio interne dédiée ou via une horloge externe pour permettre la synchronisation.
- Quatre USART plus deux UART
- Un USB OTG pleine vitesse et un USB OTG haute vitesse avec capacité pleine vitesse (avec l'ULPI),
- Deux CAN
- Une interface SDIO/MMC
- Ethernet et l'interface caméra disponibles uniquement sur les appareils STM32F407xx.

La famille STM32F407xx fonctionne dans la plage de température de -40 à +105 °C à partir d'une alimentation de 1,8 à 3,6 V. La tension d'alimentation peut descendre jusqu'à 1,7 V lorsque l'appareil fonctionne dans la plage de température 0 à 70 °C à l'aide d'un superviseur d'alimentation externe. Un ensemble complet de modes d'économie d'énergie permet la conception d'applications à faible consommation d'énergie.

Ces caractéristiques rendent la famille de microcontrôleurs STM32F407xx adaptée à une large gamme d'applications :

- Commande de moteur et contrôle d'application
- Équipement médical
- Applications industrielles : API, onduleurs, disjoncteurs
- Imprimantes et scanners Systèmes d'alarme, interphone vidéo et CVC
- Appareils audio domestiques



FIGURE 3.13 – Vue de face de la carte STM32.

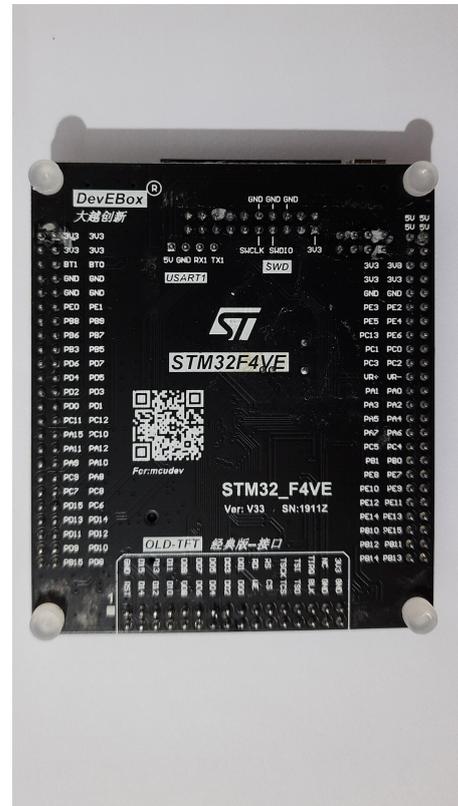


FIGURE 3.14 – Vue de dessous de la carte STM32.

3.7.3 The MPU9250 sensor

Le MPU-9250 est un module multipuce (MCM) composé de deux matrices intégrées dans un seul boîtier QFN. Une matrice abrite le gyroscope 3 axes et l'accéléromètre 3 axes. L'autre matrice abrite le magnétomètre 3 axes AK8963 d'Asahi Kasei Microdevices Corporation. Par conséquent, le MPU-9250 est conçu pour s'interfacer avec plusieurs capteurs numériques non inertiels, tels que des capteurs de pression, sur son port I2C auxiliaire

- Accéléromètre MEMS 16 bits à 3 axes avec plage programmable
- Gyroscope MEMS 16 bits à 3 axes pour détecter la rotation avec plage programmable
- Magnétomètre MEMS 16 bits à 3 axes pour détecter la direction de la boussole magnétique
- Processeur de mouvement numérique MotionFusion à 9 axes (DMP)
- Plage de capteur de température de -40 à +85C

- Sortie d'interruption
- Interface I2C et SPI
- Alimentation 5 V (le régulateur 3,3 V intégré alimente l'appareil MPU-9250)
- Compatible logique 3.3V

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le robot poisson développé dans le cadre de ce projet de fin d'études avec ses différentes parties, de la CAO, à la validation logiciel sous Simscape de la loi de commande, à l'implémentation sur une carte de développement à base d'un arm cortex.

Conclusion Générale

Dans ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à la conception et la réalisation d'un robot poisson, qu'on a appelé BIANCA.

D'abord, nous avons présenté une structure mécanique articulée inspirée des robots poissons et des travaux antérieurs dans ce domaine. Nous avons par la suite développé une loi de commande rythmique inspirée du mouvement biomécanique des poissons, appelée réseau locomoteur Spinal (Central Pattern Network en anglais, abrégé. CPG).

Une fois cette commande a été validée sous la plateforme Simulink de Matlab, nous l'avons implémenté sur une carte de développement à base d'un corps ARM.

Ce projet reste un prototype, les premiers essais sont concluants par rapport à rythmicité de son mouvement. Une validation sous l'eau est en perspective.

Durant ce projet, j'ai appris beaucoup de choses, de la conception, à la modélisation et l'implémentation d'une loi de commande spécifique à ce type de robot.

Bibliographie

- [1] Datasheet. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1106582/etc/mg90s/1>. In *MG90S*, 2020.
- [2] Datasheet2. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131873/etc2/mg996r.html>. In *MG996R*, 2020.
- [3] Adel Khadhraoui. *Modélisation et simulation interactive pour la navigation d'un robot sous-marin de type ROV Observer*. Theses, Université Paris Saclay, November 2015.
- [4] Mathworks. <https://fr.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>. In *simscape-multibody*, 2020.
- [5] Xiang Yang, Zhengxing Wu, and Junzhi Yu. Design and implementation of a robotic shark with a novel embedded vision system. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 841–846, 2016.