

CHLOÉ GANGLOFF

Rapport de PRT

Conception, implémentation et commande d'un actionneur événementiel basé guidage
flexible multistable et AMF

20 Janvier 2023

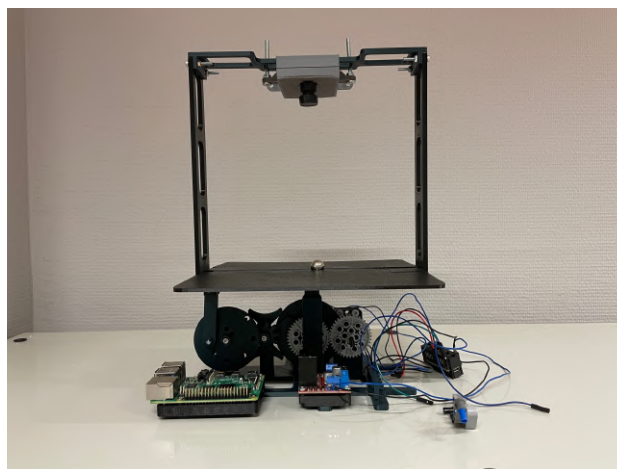


Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Contexte	4
1.2	Problématique	4
1.3	Prise en main du système	5
1.3.1	Maquette existante	5
1.3.2	Mise en marche	6
2	Etat de l'art	7
2.1	Caméra événementielle	7
2.2	Commande événementielle	7
2.3	Mécanismes compliants multistables	8
2.4	Types d'actionneurs compliants	8
2.4.1	Actionneurs électrothermiques	8
2.4.2	Actionneurs AMF	9
2.4.3	Actionneurs piézoélectriques	9
3	Conception de la maquette	10
3.1	Solution étudiées	10
3.1.1	Solution par vis-écrou	10
3.1.2	Solution par vérin	10
3.1.3	Solution mécanisme 4 barres	11
3.2	Description de la solution retenue	12
3.2.1	Croix de Malte	12
3.2.2	Conception du mécanisme 4 barres	12
3.2.3	Couplage entre la croix et le mécanisme 4 barres	13
3.2.4	Plateau	14
3.2.5	Maquette fabriquée	15
4	Asservissement	17
4.1	Stratégie d'asservissement	17
4.2	Simulation dans Simulink	19
4.3	Code	20
4.4	Résultats	21
5	Guidage flexible	23
5.1	Solution utilisant le mécanisme en T	23
5.1.1	Solution n°1	23
5.1.2	Solution n°2	24
5.1.3	Solution n°3	25
5.2	Mécanisme multistable en rotation	26
5.3	Choix de la solution la plus pertinente	26
6	Conclusion	28

Table des figures

1	Schéma de la maquette initiale avec ses composantes	5
2	[12] Principe de fonctionnement de la DVS	7
3	[7] Principe de fonctionnement de la détection d'évènements	7
4	[15] Gauche : actionneur en U ; Droite : actionneur en V	9
5	Schéma de principe du système vis-écrou	10
6	Schéma de principe du système par vérins	11
7	Schéma de principe du système 4 barres	11
8	Principe de fonctionnement de la croix de Malte	12
9	Mécanisme 4 barres	13
10	Système d'actionnement complet	13
11	Schéma du mécanisme 4 barres	14
12	CAO du plateau et du support caméra	15
13	Prototype du mécanisme	15
14	Maquette finale	16
15	Différents cas de figure pour l'asservissement	18
16	Résultats avec le modèle du moteur pour une perturbation en vitesse à $t = 6s$	19
17	Résultats avec le modèle du moteur sans réglage du délai	20
18	Résultats avec le modèle du moteur avec un réglage	20
19	Position de la bille en fonction du temps pour la première méthode d'asservissement, pour une consigne de 0	22
20	3 configurations du mécanisme en T	23
21	Solution utilisant le mécanisme 4 barres	24
22	Solution par 2 modules en T	25
23	Solution tirée de l'article [1]	25
24	Solution de mécanisme tristable en rotation	26
25	Mise en série des modules tristables en rotation	27
26	Concept de plateau utilisant le module tristable en rotation	27

1 Introduction

1.1 Contexte

Dans le domaine des systèmes embarqués, la gestion des ressources est une problématique importante, car elles sont limitées et contraintes. L'emploi d'une approche événementielle, pour laquelle on n'utilise des ressources uniquement quand un événement est déclenché, traduisant Lors du PFE de Jean Soudier en 2019, une architecture événementielle complète a été mise en place sur un exemple de l'asservissement visuel d'une bille sur un rail à 1 degré de liberté.

La caméra utilisée était une caméra événementielle ou DVS, qui ne renvoie que les pixels ayant détecté un changement de luminosité, c'est-à-dire un mouvement, alors qu'une caméra classique va envoyer la totalité des pixels de l'image périodiquement. Cela permet donc de réduire la quantité d'information transmise aux parties dynamiques de la scène qui nous intéressent ce qui améliore la rapidité de traitement et diminue la latence.

Le contrôleur était également événementiel, car il ne calculait la commande que lorsque l'erreur dépassait un seuil ce qui permet de réduire la quantité de calcul et la mise en route de l'actionneur. On peut aussi considérer l'actionneur comme événementiel, car il n'est activé que lorsqu'un événement est déclenché par le contrôleur et reste éteint le reste du temps.

Une maquette a été fabriquée afin de réaliser cet asservissement événementiel de la bille.

1.2 Problématique

L'implémentation de l'architecture complète a permis d'obtenir des résultats prometteurs. Néanmoins, le choix du mécanisme d'actionnement retenu dans cette première approche n'était pas suffisamment pertinent d'un point de vue énergétique. L'objectif de ce PRT est ainsi de concevoir un mécanisme d'actionnement du plateau permettant des états d'inclinaison discrète du plateau, permettant de réduire la consommation en énergie de l'actionneur.

Le plateau pourra adopter trois configurations différentes : horizontal, incliné vers la droite et vers la gauche avec un même angle. Un asservissement sera implémenté pour équilibrer la bille sur le plateau à l'aide de ces trois angles. Une fois cette partie réalisée l'objectif sera de réfléchir à une structure basée guidage flexible multistable permettant de réaliser les mêmes trois états du plateau que pour le mécanisme conçu à l'étape précédente, dans l'objectif de réduire encore la consommation d'énergie.

1.3 Prise en main du système

1.3.1 Maquette existante

La première étape de ce projet a été de prendre en main le système existant, fabriqué lors du PFE de Jean Soudier. Cette maquette permet de réaliser l'asservissement de la bille sur un rail à l'aide d'une caméra événementielle.

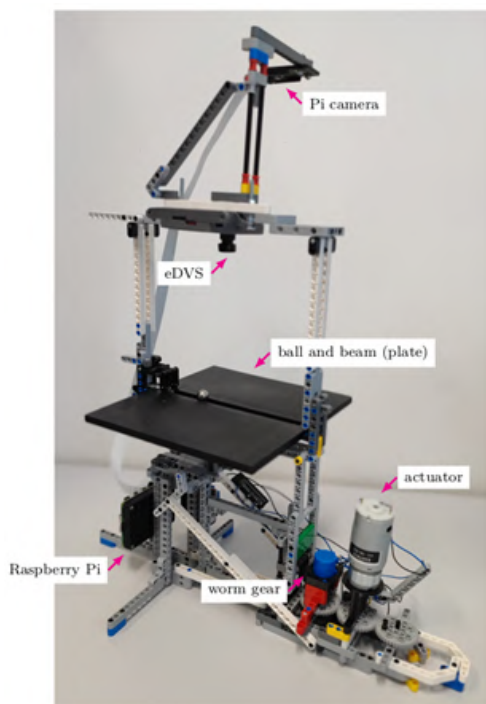


FIGURE 1 – Schéma de la maquette initiale avec ses composantes

L'actionnement est réalisé par un moteur à courant continu, relié à un système vis-écrou permettant de faire basculer le plateau et ainsi faire bouger la bille sur le rail. La caméra événementielle est placée au-dessus du rail pour permettre la détection de la position de la bille. Le support de la caméra est rigidement lié au plateau afin que la caméra soit toujours dans la même orientation que la plateau.

La commande est réalisée par une Raspberry Pi4 qui va faire tourner le programme contrôlant le système. Elle envoie les consignes à une Teensy 4.0 via USB, qui va elle-même générer un signal PWM sur deux sorties qui sont reliées à un pont en H. Celui-ci est relié au moteur et permet de faire tourner le moteur à la vitesse et dans le sens désiré.

La mesure de la position angulaire de l'arbre moteur se fait à l'aide d'un potentiomètre relié par une roue dentée. La valeur de résistance en sortie sera mesurée par le Teensy et renvoyée à la Rpi. Enfin, la eDVS est connectée à la Rpi pour la réception des événements.

On peut se connecter avec notre ordinateur à la Rpi en Ethernet à l'aide de MobaXterm, ce qui permet de se connecter en SSH et de modifier les fichiers de code et récupérer les fichiers de mesure générés facilement.

Le code permettant l'asservissement de la bille était déjà présent sur la Rpi, facilement exécutable et modifiable via MobaXterm. Celui-ci comporte 4 threads fonctionnant en même temps, d'où la nécessité d'utiliser une Raspberry Pi4.

1.3.2 Mise en marche

J'ai pu mettre en marche la maquette pour me familiariser avec le système et son fonctionnement. Cela m'a permis une première compréhension du code et de l'architecture du système. La manipulation de cette maquette a pu mettre en lumière plusieurs défauts. Le premier est l'utilisation de Legos pour sa structure, rendant le système très flexible et peu rigide. Il faut être prudent en déplaçant la maquette pour ne pas la casser. Au bout d'un certain nombre de mise en marche, la pièce plastique faisant office de vis a fini par se séparer et ne plus actionner le plateau. Cela a fait tourner le moteur dans le vide, dérégulant la mesure faite sur le potentiomètre.

2 Etat de l'art

2.1 Caméra événementielle

La particularité de ce système est l'utilisation d'une caméra événementielle (DVS) pour faire l'asservissement de la bille en position. L'article [12] présente le fonctionnement et les caractéristiques de la caméra utilisée dans le cadre de ce travail, et le [8] compare les différentes caméras événementielles existantes de nos jours. Au lieu de transmettre la totalité de l'image comme pour les caméras classiques, la DVS ne transmet que des événements correspondant à un changement d'intensité d'un pixel. Cela réduit ainsi la quantité d'informations transmises ainsi que sa consommation d'énergie.

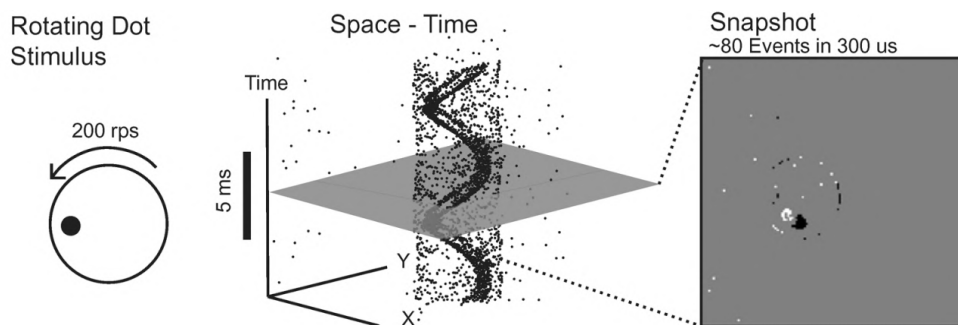


FIGURE 2 – [12] Principe de fonctionnement de la DVS

Cependant, ce fonctionnement asynchrone et indépendant pose un problème pour la commande, qui doit être adaptée en conséquence.

2.2 Commande événementielle

Un des problèmes qui se pose avec l'utilisation d'une caméra événementielle pour la commande est son caractère asynchrone : la période d'échantillonnage n'est pas fixe. On ne peut donc pas appliquer un PID classique. L'article [7] présente un PID modifié déclenché par événement, utilisé dans l'algorithme de cette maquette. L'asservissement comporte une fonction de déclenchement d'évènements qui active le PID seulement lorsque l'erreur dépasse un certain seuil défini par l'utilisateur.

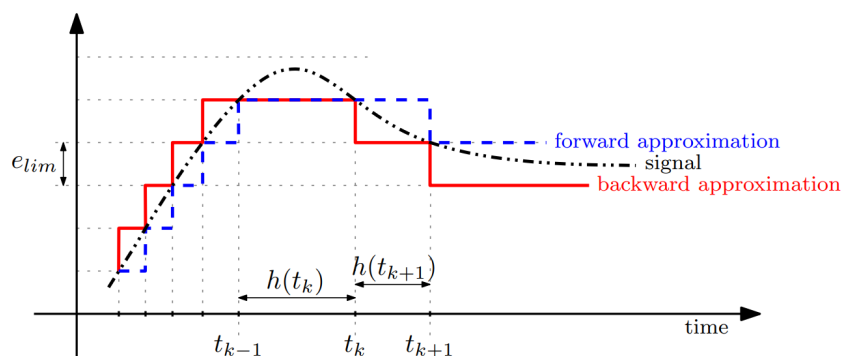


FIGURE 3 – [7] Principe de fonctionnement de la détection d'évènements

L'article [16] présente le travail réalisé durant le PFE de Jean Soudier sur la maquette de contrôle

de trajectoire d'une bille sur un plateau. Ce système s'applique à contrôler en position une bille sur un plateau pouvant être incliné. La mesure de la position de la bille est faite par la caméra événementielle. [6], [13], [14] et [2] présentent des applications utilisant la DVS pour de la commande par vision.

2.3 Mécanismes compliants multistables

La seconde étape du travail de ce PRT est de trouver une architecture basée guidage flexible multistable pour réaliser l'inclinaison discrète du plateau (3 positions). Cette approche permet d'avoir une faible consommation d'énergie. Il existe dans la littérature des exemples de mécanismes multistables compliants, pouvant être utilisés lors de la conception du plateau.

Les modules bistables à la base de nombreux mécanismes multistables sont les poutres en flexion. L'article [10] étudie le système bistable des poutres incurvées, avec leurs différents modes de flambage. Certains mécanismes multistables sont composés de plusieurs modules bistables en parallèle. La thèse [17] présente un micro robot composé de modules bistables mis en cascade, qui peut atteindre de nombreuses positions différentes. L'actionnement est fait par des actionneurs thermiques (voir partie suivante). La thèse [5] présente la conception du module bistable et son actionnement utilisé dans le robot [17].

L'article [19] présente un système multistable programmable, qui peut donc avoir plus ou moins de degrés de stabilité selon la programmation faite par l'utilisateur. Le système détaillé est le mécanisme en T, pouvant être monostable, bistable, tristable ou quadristable. [4] présente une configuration de mécanisme tristable en décrivant la manière de le synthétiser.

L'article [1] propose un module tristable qui peut être facilement répliqué et mis en série. Il est composé d'un mécanisme tristable en T, d'un mécanisme compliant de positionnement pouvant convertir chaque état en un angle ainsi qu'un élément de couplage. Ce mécanisme est intéressant car il possède les caractéristiques que l'on recherche, c'est à dire être tristable compliant et actionné par AMF.

2.4 Types d'actionneurs compliants

L'utilisation de systèmes compliants multistables pour une faible consommation d'énergie nécessite d'avoir des actionneurs adaptés. La suite de ce document en présente différents types utilisés pour les mécanismes multistables.

2.4.1 Actionneurs électrothermiques

Les actionneurs thermiques fonctionnent par l'effet Joule : le passage du courant va causer un échauffement déclenchant le mouvement du système. Plusieurs types d'actionneurs existent : [15] présente différents types d'actionneurs électrothermiques. Un premier est l'actionneur en U, qui comporte un bras fin "chaud" et épais "froid", générant une déflexion au passage du courant à cause du différentiel de température. Cet actionneur est notamment utilisé dans le microrobot [17]. Un autre type est l'actionneur en V, dont le modèle dynamique et l'analyse sont réalisés dans [21]. Celui-ci est composé de 2 poutres encastrées de chaque côté et fixées à une navette centrale. Comme précédemment, lorsqu'une tension est appliquée au matériau, il se dilate et fait se déplacer la navette centrale. Le système [3] utilise ce type d'actionneur pour réaliser un système de positionnement 2D monolithique.

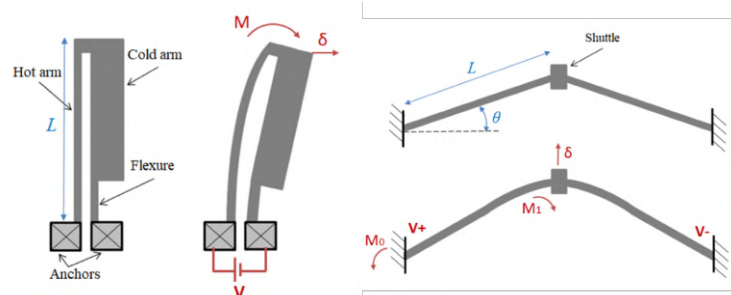


FIGURE 4 – [15] Gauche : actionneur en U ; Droite : actionneur en V

2.4.2 Actionneurs AMF

Les AMF (Alliages à Mémoire de Forme), sont des matériaux ayant la propriété de se déformer et de pouvoir revenir à leur forme originale lorsqu'ils sont chauffés. Ils peuvent donc être utilisés pour faire passer un mécanisme multistable vers une autre position. L'article [9] présente l'utilisation des fils AMF pour la robotique molle ou continue, en détaillant d'abord les principes théoriques puis en présentant la conception d'un robot actionné par AMF. Celui-ci n'a pas de joints, et est uniquement actionné par des fils AMF qui se déforment sous tension et permettent de faire se bouger le robot. [11] détaille un actionneur AMF bistable utilisant des aimants pour maintenir les 2 positions stables. Celui-ci devient faible en consommation d'énergie de par son caractère bistable, le maintien dans une certaine position du fil AMF pouvant être assez consommateur.

2.4.3 Actionneurs piézoélectriques

Enfin, il existe des actionneurs utilisant des matériaux piézoélectriques, c.à.d ayant la propriété de se déformer sous l'action d'un champ électrique. L'article [20] montre une utilisation d'un matériau de ce type pour réaliser l'actionnement d'un mécanisme compliant et donner un actionneur "stick-slip". De même, [18] montre un exemple de pince monolithique utilisant un actionneur piézoélectrique.

3 Conception de la maquette

L'étape suivante du projet était de concevoir une maquette pouvant faire basculer la bille selon trois angles déterminés. Il fallait aussi que le système ait un comportement événementiel, donc il faut que le moteur ne s'active que lorsque la condition de l'évènement est remplie.

Il fallait donc trouver un mécanisme permettant d'avoir des angles discrets en sortie et qu'il soit si possible autobloquant pour que le moteur ne soit pas activé entre les états. J'ai aussi décidé de ne pas utiliser de Lego® pour faire la maquette afin de réduire la flexibilité du système et de le rendre plus compact, ce qui facilite son transport.

Plusieurs solutions ont été étudiées avant de trouver le résultat final.

3.1 Solution étudiées

3.1.1 Solution par vis-écrou

Une première possibilité était de reprendre l'architecture de la maquette précédente utilisant un mécanisme vis-écrou pour faire les positions discrètes.

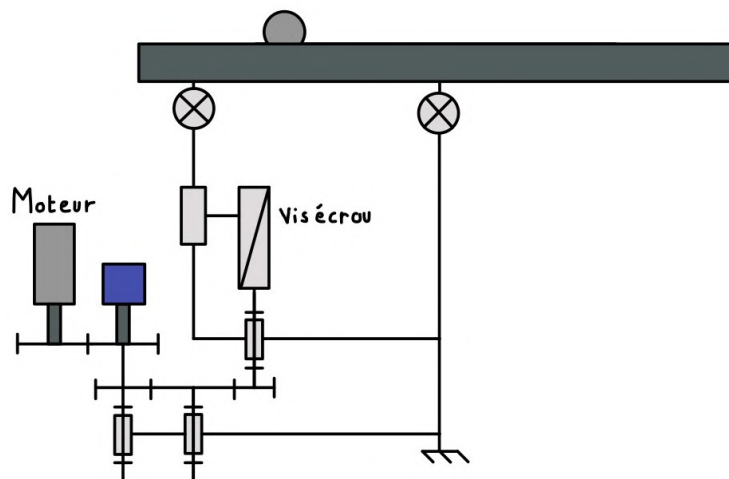


FIGURE 5 – Schéma de principe du système vis-écrou

Ce système a l'avantage d'être autobloquant, car la vis n'est pas réversible, l'actionnement peut donc être événementiel. Cependant, l'angle de sortie dépend de la position du moteur, donc si il y a un dépassement ou une erreur statique cela aura un impact sur l'orientation du plateau. De plus, la pièce faisant office de vis s'est séparée sur l'ancienne maquette et a bloqué.

3.1.2 Solution par vérin

Une seconde solution était d'utiliser un mécanisme avec deux liaisons prismatiques pour réaliser le pivotement du plateau. Ce mécanisme peut donc être actionnée par deux vérins reliés aux extrémités du plateau :

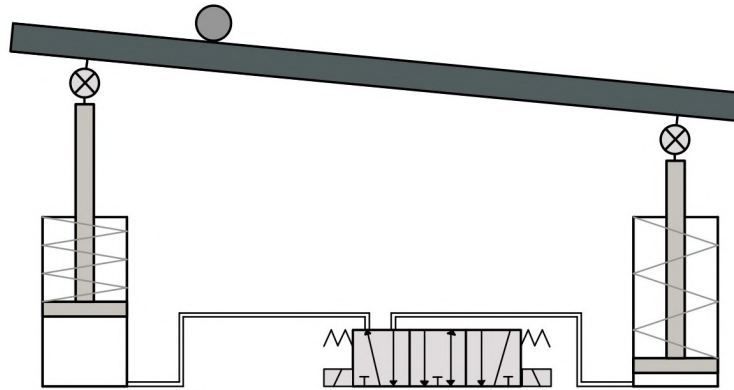


FIGURE 6 – Schéma de principe du système par vérins

L'angle de sortie peut être réglé en ajoutant des butées réglant la hauteur de sortie du piston. L'utilisation d'un distributeur 5/3 bistable permet de garder la position en mémoire sans alimentation. Cependant, l'utilisation de pneumatique n'est pas pratique et nécessite une source de pression. De plus, le point de pivotement du plateau n'est pas fixe.

3.1.3 Solution mécanisme 4 barres

Cette dernière solution est utilisée par plusieurs systèmes éducatifs d'équilibrage de billes pouvant être trouvés sur internet. Elle reprend le principe des 4 barres, où une manivelle actionnée par un moteur fait pivoter le plateau relié par une bielle. Cette manivelle est souvent remplacée par une roue sur laquelle est attachée la bielle.

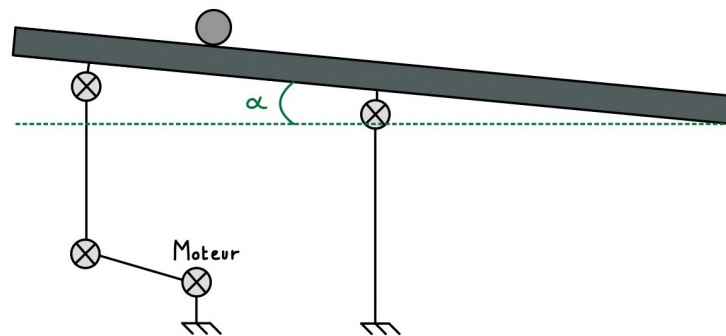


FIGURE 7 – Schéma de principe du système 4 barres

Cette solution est simple à réaliser et l'angle de pivotement peut être réglé en plaçant le pivot de la bielle plus ou moins loin de l'axe de la roue d'entrée. Cependant, en l'état ce mécanisme n'est pas autobloquant et le moteur doit appliquer une force en permanence pour maintenir l'angle. De plus, l'angle de sortie est conditionné par la position du moteur, ce qui le rend sensible au dépassement ou aux erreurs.

C'est ce type de mécanisme qui a été choisi pour réaliser la nouvelle maquette, en le modifiant pour respecter les contraintes de fixées.

3.2 Description de la solution retenue

La nouvelle maquette est réalisée entièrement en impression 3D, à l'exception de roues dentées Lego® provenant du système précédent. Les dimensions du plateau ont été conservées, ainsi que la distance entre la caméra et le rail, afin de ne pas avoir à recharger les paramètres de l'asservissement visuel.

3.2.1 Croix de Malte

La solution retenue combine le principe du mécanisme 4 barres décrit précédemment et le mécanisme à croix de Malte. Celui-ci est un mécanisme de transformation de mouvement de rotation continu en rotation alternative. Le principe est le suivant : une roue en entrée tourne en continu et comporte un ergot cylindrique. Celui-ci va passer dans une rainure de la croix ce qui va la faire tourner de $\frac{1}{N_{\text{rainure}}}$ tours. Lorsque l'ergot ressort de la croix celle-ci est bloquée et ne peut pas pivoter.

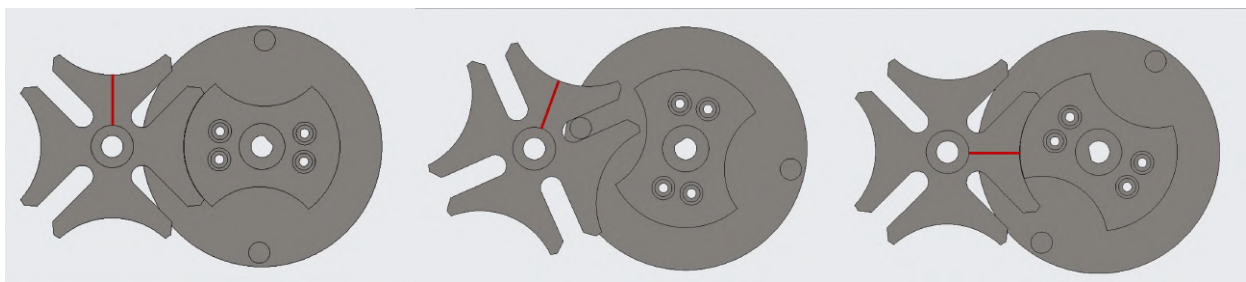


FIGURE 8 – Principe de fonctionnement de la croix de Malte

Ce mécanisme à l'avantage de permettre des mouvements discontinus en tournant toujours du même angle, ce qui peut être exploité pour réaliser les angles discrets sur notre système. Ainsi si le moteur dépasse la position de consigne ou qu'il a une erreur statique, cela n'aura aucun impact sur le pivotement du plateau. De plus, la croix est automatiquement bloquée après que l'ergot soit ressorti grâce aux formes complémentaires en forme de demi-cercle. Elle permet donc un fonctionnement événementiel de l'actionneur comme désiré.

On ajoute sur la pièce d'entrée reliée au moteur une roue dentée qui engrène sur une autre reliée à l'axe du potentiomètre situé à côté. Cela permet de mesurer la position angulaire du moteur pour l'asservissement.

3.2.2 Conception du mécanisme 4 barres

Le mécanisme 4 barres est composé d'une roue faisant office de manivelle, à laquelle est attachée une bielle. Le point d'attache peut être décalé grâce aux différents trous placés sur la roue. La bielle est enfin reliée par une liaison de révolution au plateau, qui est fixé sur le bâti en pivot. Le mouvement de rotation de la roue va faire se déplacer la bielle de haut en bas, ce qui va faire pivoter le plateau.

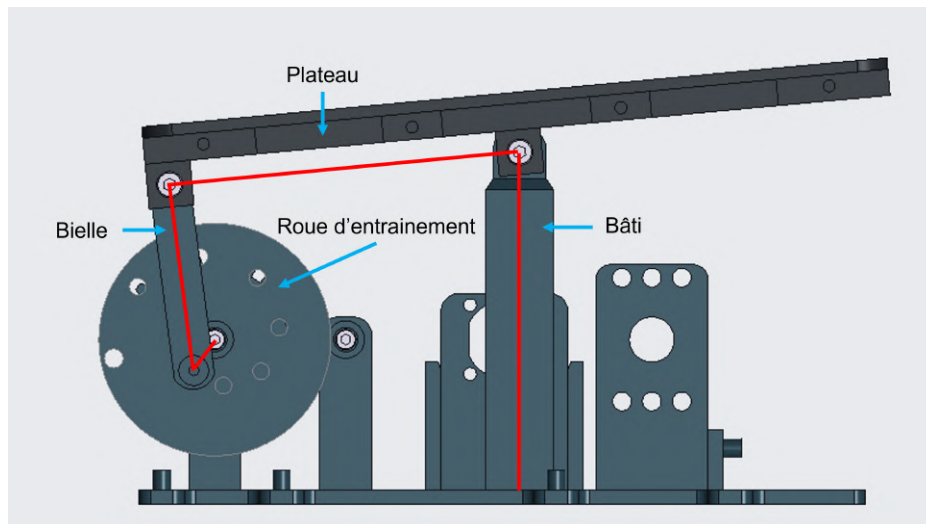


FIGURE 9 – Mécanisme 4 barres

3.2.3 Couplage entre la croix et le mécanisme 4 barres

On utilise des roues dentées pour relier le système de croix de Malte au mécanisme 4 barres, afin de réduire l'angle de rotation transmis par la roue. En effet, une croix ayant quatre rainures tournera de 90° à chaque passage, ce qui est trop important.

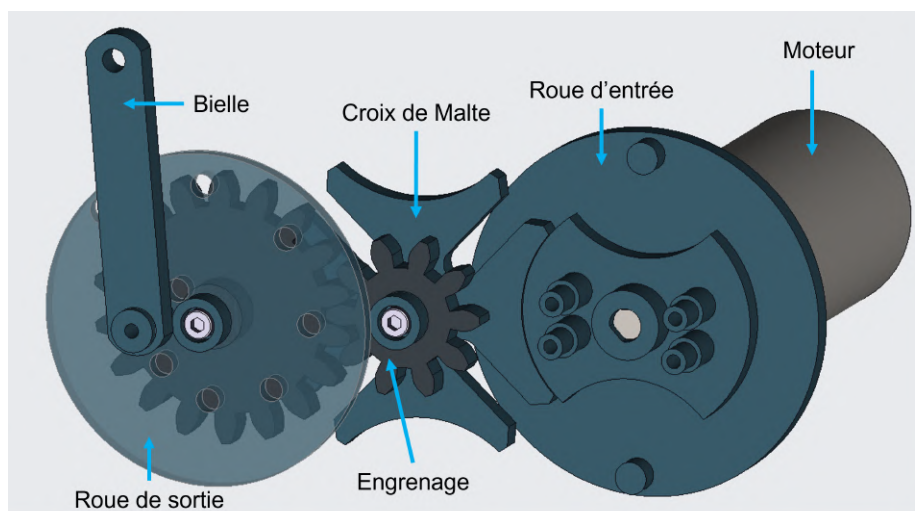


FIGURE 10 – Système d'actionnement complet

On peut calculer l'angle de bascule du plateau en fonction des dimensions des éléments de la manière suivante :

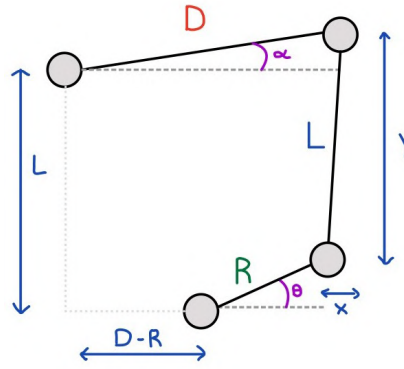


FIGURE 11 – Schéma du mécanisme 4 barres

$$\begin{cases} R \cdot \cos(\theta) + X + D \cdot \cos(\alpha) + D - R = 0 \\ R \cdot \sin(\theta) + Y - D \cdot \sin(\alpha) - L = 0 \\ X^2 + Y^2 = L^2 \end{cases} \quad (1)$$

En combinant les équations, on trouve :

$$2D(-R \cos(\theta) - (D - R)) \cos(\alpha) + 2D(R \sin(\theta) - L) \sin(\alpha) - 2R(R - D) \cos(\theta) - 2RL \sin(\theta) + 2D^2 - 2DR + 2R^2 = 0 \quad (2)$$

On utilise l'angle moitié pour trouver la valeur de α en fonction de θ :

$$\begin{cases} A = 2D(-R \cos(\theta) - (D - R)) \\ B = 2D(R \sin(\theta) - L) \\ C = -2R(R - D) \cos(\theta) - 2RL \sin(\theta) + 2D^2 - 2DR + 2R^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{A + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C - B} \right) \quad (4)$$

3.2.4 Plateau

Afin de pouvoir fixer les différents éléments conçus, le plateau présent dans la maquette précédente n'a pas été gardé. Cependant, il nouveau garde les mêmes dimensions et la même forme. Il possède une surface plane importante afin de ne pas perturber le suivi de la bille par la caméra : cela fait office de fond uni qui ne déclenche pas d'évènements lors du mouvement.

L'impression de ce plateau ayant provoqué des problèmes liés à ses dimensions, il a été séparé en trois parties reliées entre elles par des vis. Sur ce plateau vient se fixer le support maintenant la caméra, qui lui est rigidement liée pour que la caméra reste toujours fixe par rapport au rail.

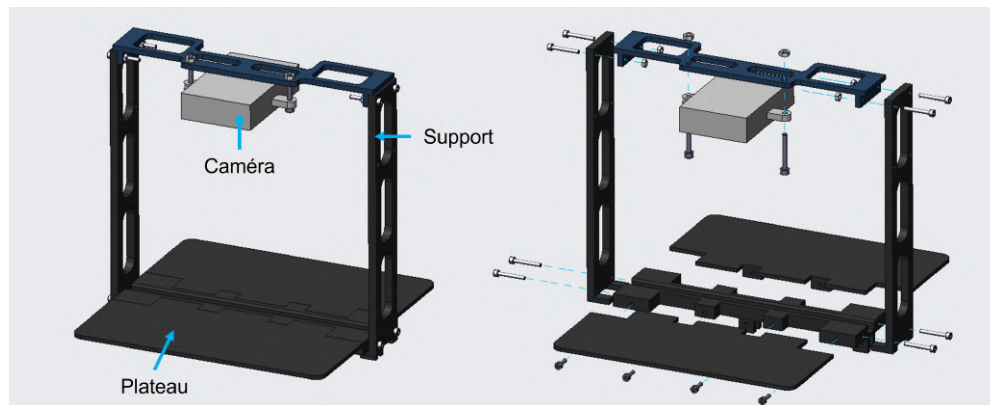


FIGURE 12 – CAO du plateau et du support caméra

3.2.5 Maquette fabriquée

Une première étape avant l'impression du système complet a été de réaliser un prototype du mécanisme pour pouvoir tester son bon fonctionnement. En effet, il est important de savoir si le mécanisme peut remplir sa fonction avant l'assemblage final, et de modifier la conception le cas contraire. Cela a permis d'identifier quelques problèmes de conception, notamment l'ajout de chanfreins sur les bords des rainures pour éviter les blocages, ainsi que de valider le mécanisme.

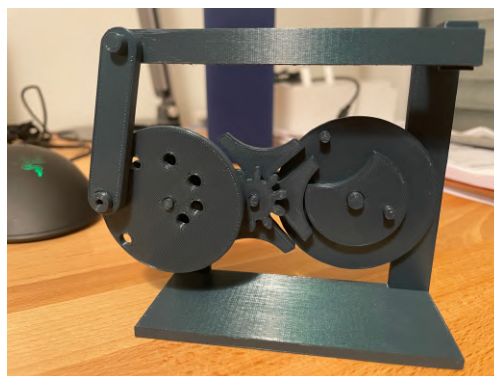


FIGURE 13 – Prototype du mécanisme

Une fois les modifications faites sur la CAO, les différentes pièces ont été fabriquées par impression 3D. Quelques autres problèmes sont survenus au moment de l'assemblage comme la flexibilité trop importante des supports de la caméra, due notamment à l'utilisation de PETG qui est plus flexible que le PLA.

Après quelques petites autres modifications, la maquette finale fut assemblée et testée. Il reste cependant un problème de flexion dans le sens perpendiculaire au déplacement de la bille, provoqué par le bâti en PLA qui n'est pas assez rigide.

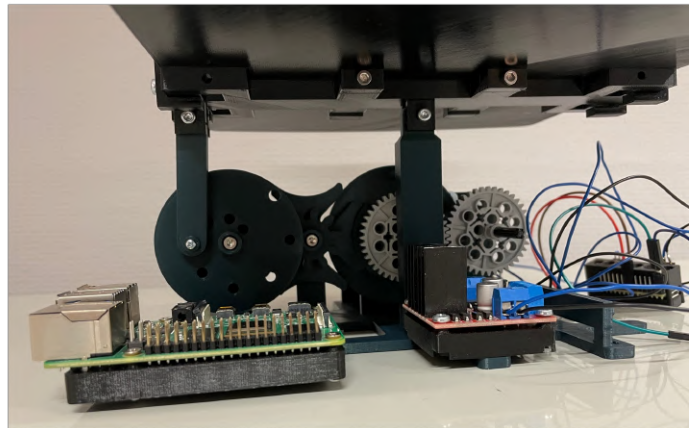
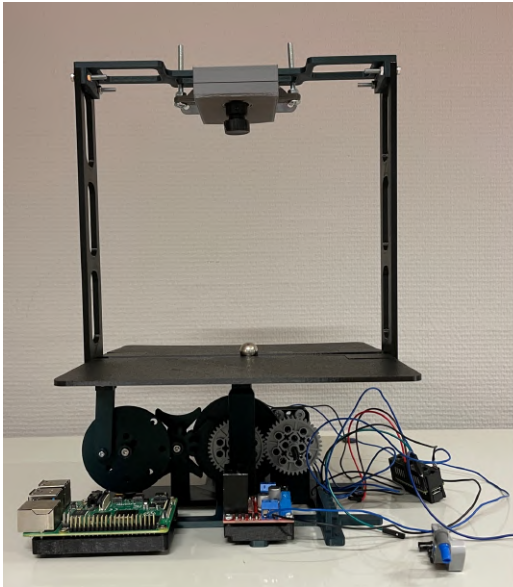


FIGURE 14 – Maquette finale

4 Asservissement

4.1 Stratégie d'asservissement

L'asservissement d'une bille avec seulement 3 angles discrets pose un certain nombre de problèmes. En effet, on ne peut pas utiliser de PID classique qui utilise toute la plage d'angle disponible pour la commande, il y aurait des oscillations autour de la position de consigne. La stratégie envisagée était ainsi une sorte de commande prédictive, car on connaît d'avance le comportement de la bille et les angles disponibles. En principe, on calcule le seuil après lequel on doit incliner le plateau pour freiner la bille jusqu'à son arrêt. Ce seuil est calculé à l'aide de la position de la bille et de sa vitesse, et est mis à jour à chaque nouvel événement pour corriger les erreurs de prédiction. Il faut cependant distinguer six différents cas pour le calcul de cette commande, en fonction du sens de progression de la bille, de sa vitesse et de sa position.

Une inclinaison du plateau en $(-\alpha)$ correspond à une accélération de la bille vers le sens positif. De même, une inclinaison du plateau en $(+\alpha)$ correspond à une accélération de la bille vers le sens négatif.

Cas 1

Si la bille est immobile sur le plateau et que l'erreur de position est positive, alors il faut incliner le plateau de sorte à ce qu'elle se déplace dans le sens positif $(+\alpha)$.

Cas 2

Si la bille est immobile sur le plateau et l'erreur de position est négative, alors il faut incliner le plateau de sorte à ce qu'elle se déplace dans le sens négatif $(-\alpha)$.

Cas 3

Si la bille a une vitesse positive et que l'erreur de position est positive, alors il faut calculer le seuil après lequel le plateau s'incline pour ralentir la bille jusqu'à la consigne $(+\alpha)$.

Cas 4

Si la bille a une vitesse positive mais que l'erreur de position est négative, alors il faut d'abord inverser le sens de la bille $(+\alpha)$ puis calculer le seuil à partir duquel elle sera ralentie $(-\alpha)$.

Cas 5

Si la bille a une vitesse négative mais que l'erreur de position est positive, alors il faut d'abord inverser le sens de la bille $(-\alpha)$ puis calculer le seuil à partir duquel elle sera ralentie $(+\alpha)$.

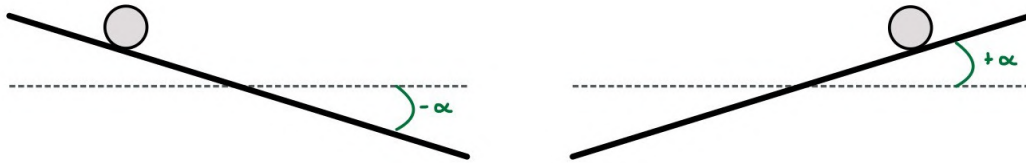
Cas 6

Si la bille a une vitesse négative et que l'erreur de position est négative, alors il faut calculer le seuil après lequel le plateau s'incline pour ralentir la bille jusqu'à la consigne $(-\alpha)$.

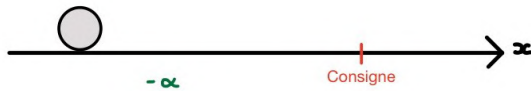
Cas 7

Lorsque la bille a une vitesse nulle et une erreur nulle, il faut arrêter le système et mettre le plateau à 0.

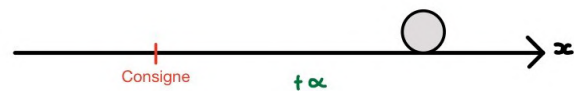
Orientation du plateau



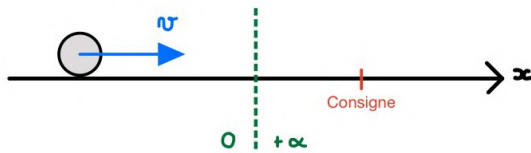
Cas 1 : $v = 0$ $e > 0$



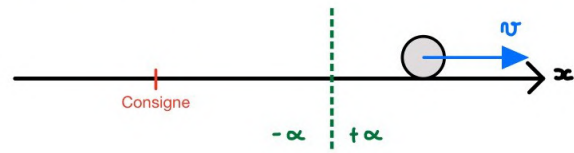
Cas 2 : $v = 0$ $e < 0$



Cas 3 : $v > 0$ $e > 0$



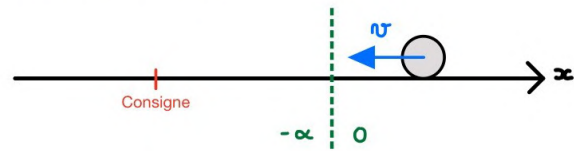
Cas 4 : $v > 0$ $e < 0$



Cas 5 : $v < 0$ $e > 0$



Cas 6 : $v < 0$ $e < 0$



Cas 7 : $v = 0$ $e = 0$

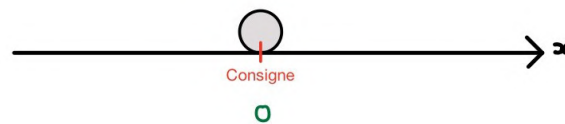


FIGURE 15 – Différents cas de figure pour l'asservissement

On calcul le seuil grâce à la connaissance du modèle de la bille sur le rail. On connaît l'accélération de la bille en fonction de l'angle d'inclinaison du plateau d'après la relation tirée de [?] suivante :

$$\left(\frac{J}{R^2} + m \right) \cdot \ddot{x} = -mg \cdot \alpha \quad (5)$$

Avec :

- J : l'inertie de la bille
- R : le rayon de la bille
- m : la masse de la bille
- x : la position de la bille sur le plateau
- α : l'angle d'inclinaison du plateau

A chaque itération de la boucle, on va mesurer la position et la vitesse de la bille sur le plateau.

- On déduit de ces informations le cas dans lequel on se trouve (décrits ci-dessus)
- On calcule le temps que va mettre la bille pour arriver à une vitesse nulle en penchant le plateau.
- On en déduit la distance de décélération de la bille.
- On calcul le seuil comme étant la différence entre la consigne et la distance de décélération.

4.2 Simulation dans Simulink

Une simulation de cette stratégie d'asservissement a été implémentée sous Simulink. Le modèle du moteur et sa fonction de transfert ont été récupérés du rapport de PFE. On ajoute un bloc « Matlab function » pour le code de l'asservissement, sous la forme d'une suite de conditions telles que décrites dans la partie précédente. On obtient les résultats suivants pour un modèle simple sans moteur :

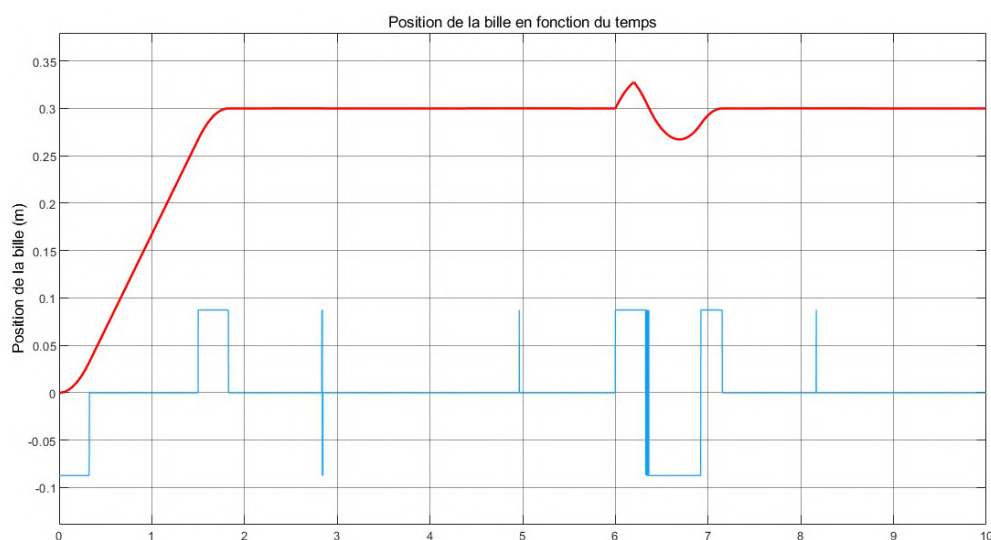


FIGURE 16 – Résultats avec le modèle du moteur pour une perturbation en vitesse à $t = 6s$

En rouge : la position de la bille sur le plateau en mm. En bleu, l'angle du plateau. On voit que pour un modèle très simplifié, l'asservissement a le comportement désiré. Les pics très fins que l'on voit sur la courbe de l'angle correspondent à des erreurs numériques de Simulink.

On réalise ensuite une simulation prenant en compte le modèle du moteur et de la maquette.

On ajoute le modèle du moteur entre la commande et le modèle de la bille. On met une saturation en sortie du moteur pour simuler l'action de la croix de Malte qui ne tourne que lorsque le moteur a

parcouru un tour complet. On ajoute à la suite le bloc permettant de calculer l'angle α en fonction de l'angle de sortie de la croix de Malte θ calculé en 4. L'angle réel de l'arbre du moteur est égal à $\theta \cdot k$, avec k le rapport de réduction des engrenages.

Comme le système de la croix de Malte induit un retard entre la commande et son application, on ajoute un coefficient au seuil de bascule afin de le prendre en compte.

Les résultats sont les suivants :

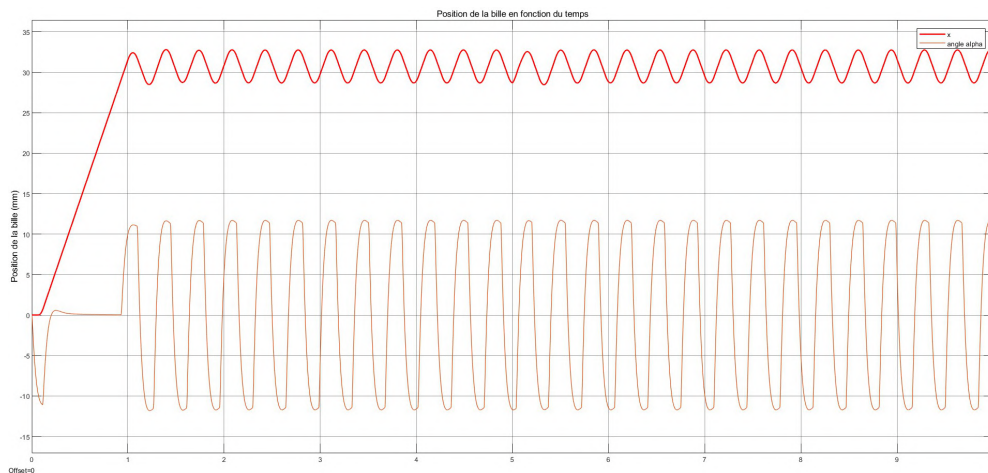


FIGURE 17 – Résultats avec le modèle du moteur sans réglage du délai

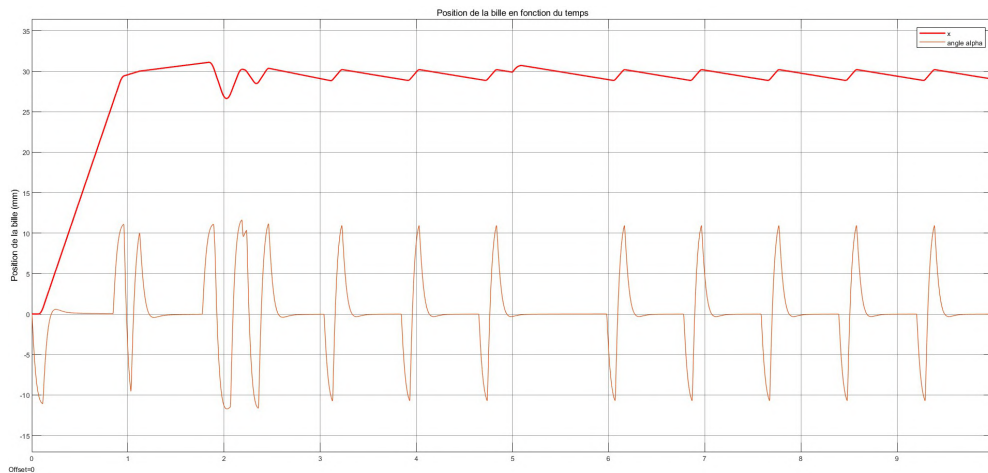


FIGURE 18 – Résultats avec le modèle du moteur avec un réglage

Dans cet exemple, j'ai atténué l'effet d'oscillation en définissant un offset sur le seuil de bascule du plateau, et j'ai augmenté les bornes autour de la consigne dans lesquelles la bille peut être stoppée. Cela a pour conséquence d'allonger les oscillations, et de réduire le nombre de bascules du plateau. Sur le système réel, la bille est freinée donc il est possible qu'avec cette méthode elle s'arrête.

4.3 Code

Le caractère événementiel du système empêche l'utilisation d'un asservissement classique. En effet, il n'y a pas de période fixe, car les événements sont déclenchés par le mouvement des objets dans le champ de la caméra. La mise à jour de la commande se fait lorsqu'un événement est

déclenché. Lorsque la différence de position entre l'instant précédent et le courant est supérieure au seuil défini appelé e_{lim} , un événement est levé pour calculer l'asservissement.

L'asservissement visuel et le PID événementiel ont été implémentés en C par Jean Soudier durant son PFE, j'ai donc pu le récupérer pour le modifier. Il fonctionne à l'aide de 4 threads différents : le principal, l'asservissement de la bille, l'asservissement du moteur et la lecture de mesure de la caméra.

Dans la boucle principale, la position du moteur sera lue toutes les 2 ms et stockée dans une variable accessible par les autres threads. C'est également cette fonction qui va déterminer si un événement est levé pour le moteur dans le cas où la différence entre les échantillons est supérieure à e_{lim} .

Le thread de la DVS permet de lire les événements envoyés et de mettre à jour la position de la bille grâce à un algorithme de cluster. Celui-ci ne va mettre à jour la position de la bille si un nouvel événement se trouve dans un certain rayon autour de la bille.

Les threads de l'asservissement de la bille et du moteur ont un fonctionnement similaire, et utilisent le même calcul de PID. Lorsqu'un événement est déclenché, une fonction de calcul de l'asservissement est exécutée permettant le calcul de la commande. Pour la caméra, la valeur de tension est stockée dans une variable accessible par le thread moteur puis un événement est levé pour celui-ci. Le thread moteur peut être activé soit par celui de la caméra, soit lorsque la différence de position du potentiomètre est supérieur au seuil.

La nouvelle commande pour contrôler la bille avec des angles discret vient remplacer le PID du thread caméra, et la consigne n'est plus une trajectoire mais une position donnée sur le plateau.

4.4 Résultats

J'ai eu quelques difficultés lors des premiers tests de la nouvelle maquette et de l'implémentation de la commande dans le code, qui ont pu me retarder dans mes tests de l'asservissement. Il y a eu au préalable une phase de test du code ainsi que de la réponse de la maquette, qui a conduit à des modifications mécaniques. Les conditions extérieures de lumière ont également été critiques pour le fonctionnement de la maquette, car le clignotement de certaines lampes de la salle où je travaillais pouvait perturber la caméra qui est très rapide.

L'asservissement implémenté dans la maquette utilise le même principe que celui simulé sur Simulink, sauf que les seuils ne sont pas calculés à chaque itération de la boucle. On se propose donc de les fixer à une valeur déterminée qualitativement, ici fixée à -20 mm et +20 mm.

Cet asservissement permet de stabiliser la bille à la position de consigne, ici prise à 0 qui est le centre du plateau. Les résultats sont les suivants :

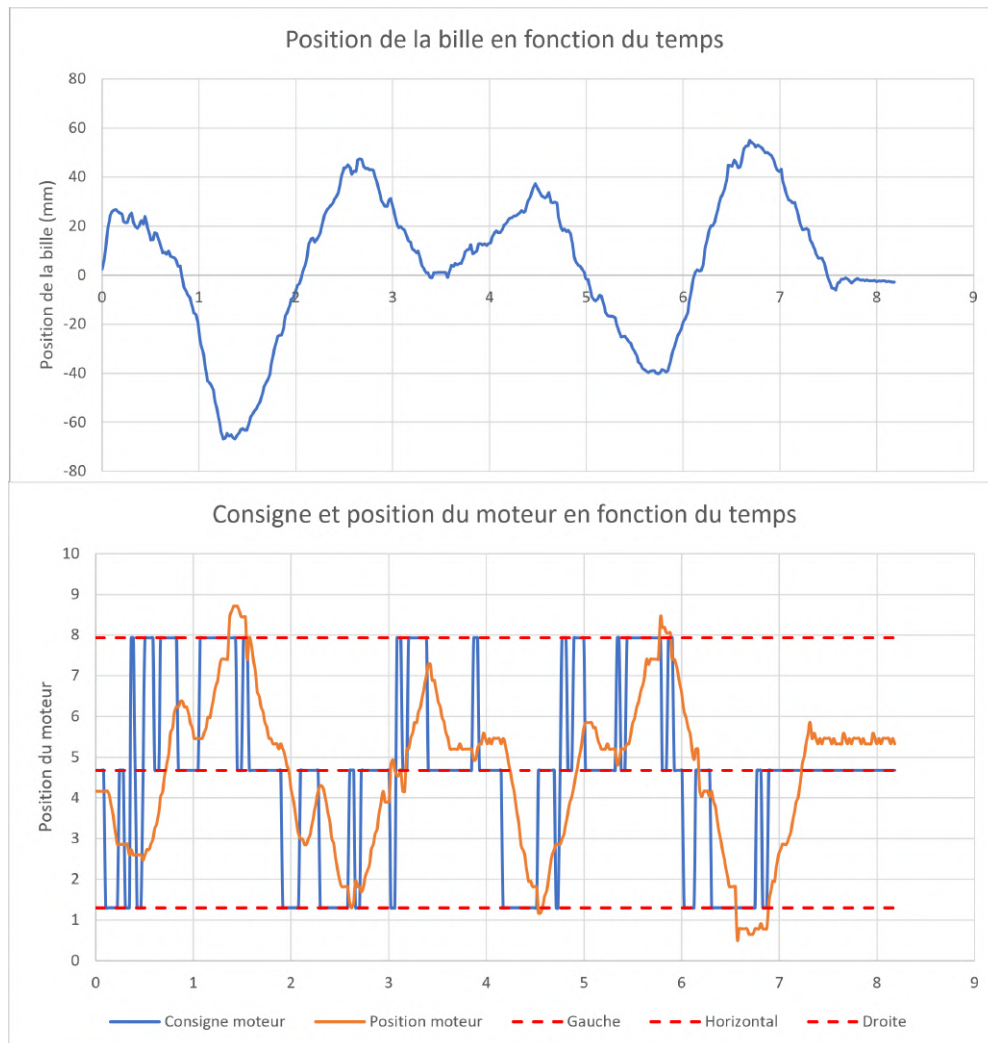


FIGURE 19 – Position de la bille en fonction du temps pour la première méthode d'asservissement, pour une consigne de 0

On voit bien ici que le retard causé par la croix de Malte empêche la plupart des consignes rapides de position du moteur d'être atteintes. Il y a également une erreur sur la position finale de la bille qui devrait être à 0, qui est due au fait qu'une plage d'arrêt autour de la consigne a été définie.

Une fois cet asservissement testé, j'ai modifié cet asservissement pour inclure les seuils calculés dynamiquement. Comme pour la simulation, la bille ne faisait que se balancer autour de la valeur de consigne sans correction de la valeur du seuil. Malheureusement, par manque de temps je ne suis pas parvenue à faire fonctionner cet asservissement. Il y a certains problèmes comme la valeur de la vitesse qui est très fluctuante et peu précise, ainsi que la position du centre de la bille qui n'est pas forcément très précisément déterminée. De plus, le fait que le système soit événementiel introduit un autre délai dans la commande, ce qui va empirer les oscillations.

5 Guidage flexible

La dernière partie de ce projet est la recherche de mécanismes basés guidage flexible multistable et AMF. On va donc utiliser des solutions au moins tristables pour avoir les trois angles différents en sortie comme sur la maquette construite. Cette partie décrit différentes propositions de solution pour ces mécanismes.

5.1 Solution utilisant le mécanisme en T

La solution la plus courante pour réaliser des modules tristables est de relier deux modules bistables entre eux. Ces modules bistables sont basés sur le principe de la poutre en flambage, que peuvent prendre deux configurations possibles en leur appliquant une force suffisante pour le basculement. On peut utiliser des AMF pour faire basculer le système d'un état à un autre.

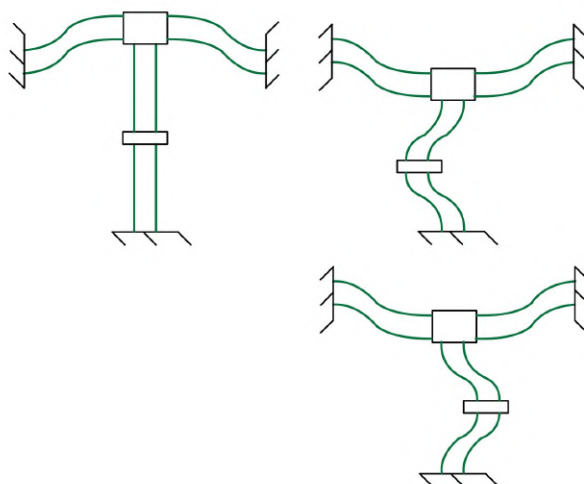


FIGURE 20 – 3 configurations du mécanisme en T

5.1.1 Solution n°1

Cette première solution utilise le mécanisme en T comme entrée du mécanisme 4 Barre. Le mécanisme remplace la roue d'entrée reliée au moteur pour générer le mouvement de rotation du plateau. Le mécanisme 4 barres peut être réalisées en utilisant des liaisons compliantes à cols circulaires, dont les caractéristiques sont bien connues.

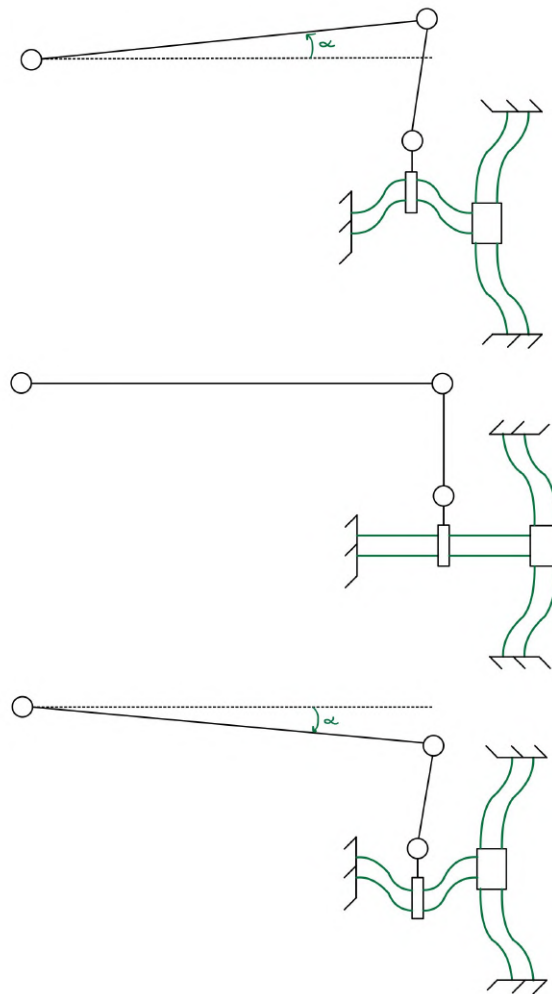


FIGURE 21 – Solution utilisant le mécanisme 4 barres

Cette solution permet de garder le même type de mécanisme que sur la maquette actuelle, donc les mêmes équations. Le mécanisme en T sera actionné par des fils AMF pour faire passer les états. Cependant, ils devront pouvoir développer suffisamment de force pour pouvoir vaincre le poids du système, qui s'applique dans la même direction que la bascule.

5.1.2 Solution n°2

Cette deuxième solution reprend le principe que pour la figure 6 de la partie maquette. On vient placer des modules tristables à chaque extrémité du plateau, qui agissent de la même manière que les vérins. L'actionnement est aussi fait par fils AMFs.

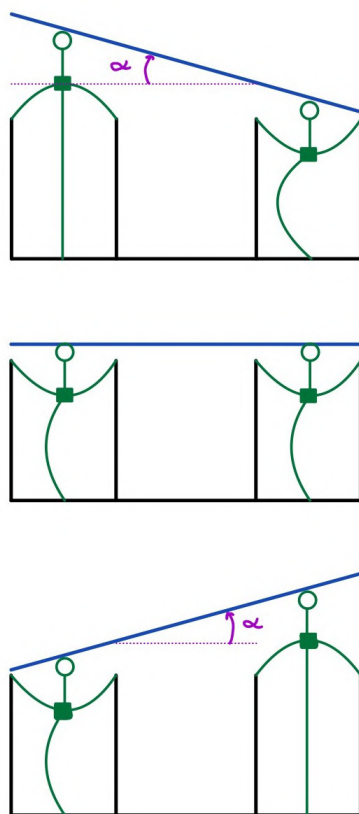


FIGURE 22 – Solution par 2 modules en T

Cette solution utilise deux modules en T, il faudra donc quatre fils AMF pour réaliser l'actionnement. La stabilité est en revanche meilleure, le plateau étant maintenu à chaque extrémité. En effet, les supports de la caméra sont attachés au plateau aux deux extrémités, donc ils génèrent une flexion à ces endroits. Espacer les points de maintien permet donc de réduire cette flexion sur le plateau.

5.1.3 Solution n°3

La dernière solution employant des modules en T est tirée de l'article [1]. Le robot présenté dans cet article était composé de plusieurs modules tristables comportant le mécanisme en T.

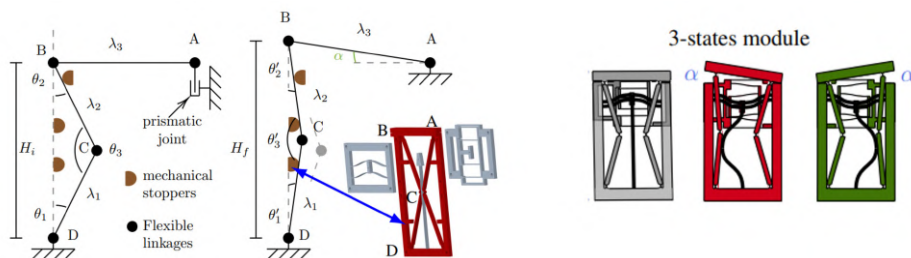


FIGURE 23 – Solution tirée de l'article [1]

Par rapport à la solution précédente, celle-ci n'utilise qu'un seul module, donc une seule paire de fils AMF. Cependant, il y aura cette fois-ci plus de flexion aux extrémités du plateau.

5.2 Mécanisme multistable en rotation

Cette solution s'inspire d'exemples trouvés dans la littérature scientifique. Le mécanisme possède quatre modules bistables précontraints situés entre une pièce extérieure fixe et la pièce de sortie faisant un mouvement de rotation. Il a deux positions stables possibles, le changement étant réalisé grâce à la bascule dans le second état stable des quatre modules bistables. Il est possible d'augmenter le nombre d'états du système en empilant ces modules. En effet, si on attache un second module sur la partie pivotante du premier, on peut avoir quatre états en sortie. On attacherait le plateau au niveau de la pièce de sortie du second module afin d'avoir les trois positions discrètes désirées.

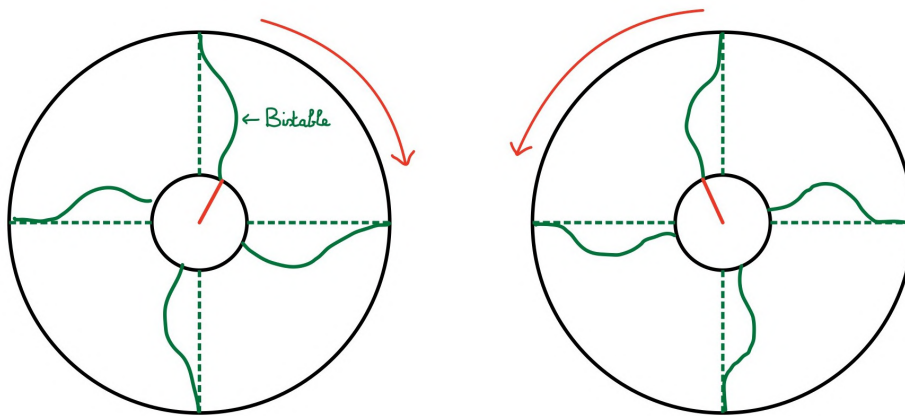


FIGURE 24 – Solution de mécanisme tristable en rotation

Cette solution a l'avantage d'être compacte, et d'avoir une relation directe entre l'angle de sortie du module et celui du plateau. L'actionnement peut se faire grâce à deux paires de fils AMF pour faire basculer les modules dans leurs états stables.

5.3 Choix de la solution la plus pertinente

Les deux solutions les plus envisageables pour réaliser la structure à angle discret à l'aide de mécanismes tristables sont la solution n°3 ainsi que la dernière.

En effet, la troisième solution a déjà été réalisée avec succès, et possède les mêmes caractéristiques que l'on cherche : il y a trois orientations différentes horizontal, gauche, droite pour un même angle α , et il est actionné par un AMF. On peut ainsi imaginer la solution en attachant le plateau au niveau de la barre pivotante d'un module. Il faudra cependant dimensionner ce module pour les caractéristiques du mécanisme que l'on a : la caméra doit être solidaire du plateau, ce qui implique que le module doit pouvoir être capable de soulever le plateau et la caméra avec son support.

Enfin, la dernière solution utilisant les modules tristables en rotation peut également être viable. En attachant l'axe de rotation du premier module au bâti du second, on peut avoir en sortie jusqu'à quatre états stables possibles, même si on se limite à trois ici.

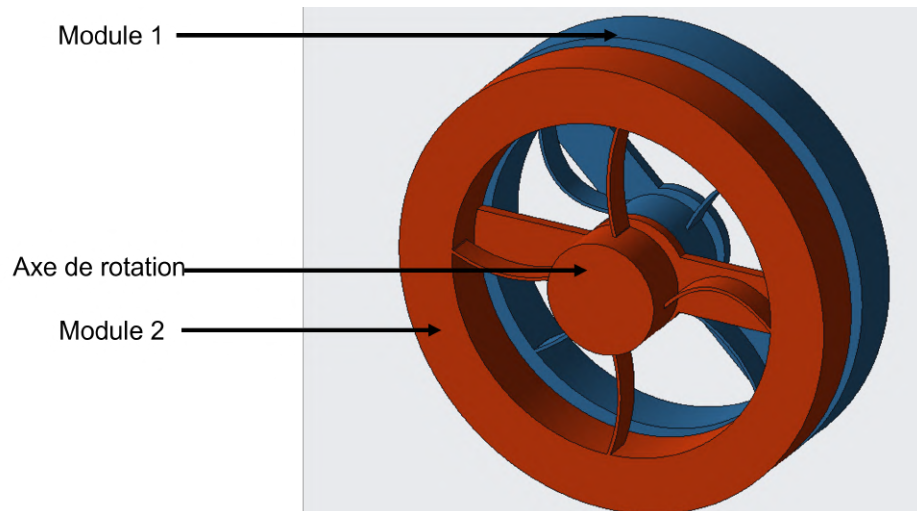


FIGURE 25 – Mise en série des modules tristables en rotation

On peut réaliser le système d'équilibrage de bille en liant rigidement l'axe de rotation de sortie des modules en série avec l'axe de rotation du plateau. Pour éviter la flexion sur l'axe on le fixe à son extrémité au bâti.

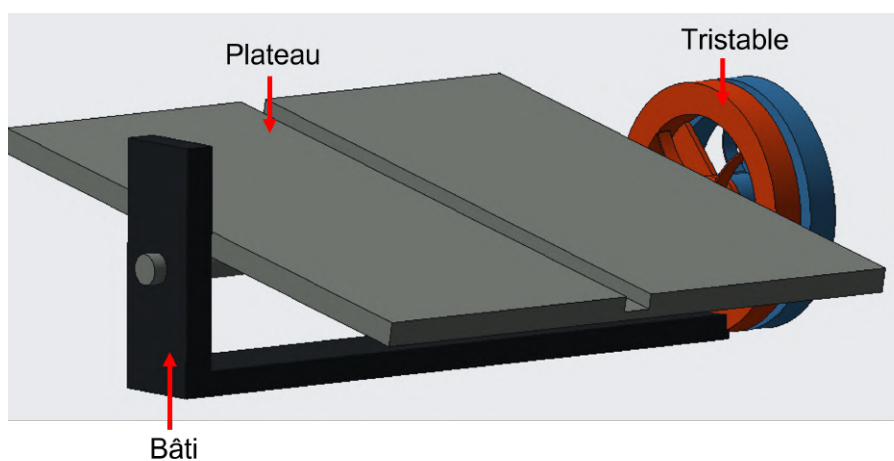


FIGURE 26 – Concept de plateau utilisant le module tristable en rotation

6 Conclusion

Dans l'ensemble, les objectifs définis ont globalement été atteints : la nouvelle maquette réalisée permet d'obtenir en sortie les trois angles discrets désirés, avec un fonctionnement événementiel puisque le moteur peut être éteint entre les événements. Cette maquette peut être toutefois améliorée en rigidifiant le bâti pour éliminer sa flexion, ou en modifiant quelques pièces pour faciliter le montage ou le remplacement de composants. Même si l'asservissement déterminé dans ce projet n'a pas pu être complètement implémenté sur la maquette réelle, un début d'équilibrage de la bille à une position donnée a été réalisé. On peut alors imaginer qu'il est effectivement possible d'avoir un asservissement efficace de la bille avec des angles discrets. Malheureusement, je n'ai pas pu aller au bout de l'implémentation de cet asservissement final par manque de temps. Enfin, l'utilisation de modules multistables pour remplacer le mécanisme actuel peut être envisagée. En réfléchissant à des solutions j'ai pu voir différents type de mécanismes multistables, et envisager des concepts où ils remplaceraient un mécanisme classique.

Il reste quand même des points à terminer pour vraiment pouvoir conclure sur la problématique donnée. On peut en effet perfectionner l'asservissement de la bille pour qu'il soit complètement compatible avec un actionnement entièrement événementiel. Ensuite, il aurait été intéressant d'effectuer une étude comparative de consommation d'énergie entre la maquette actuelle et la précédente par exemple. Enfin, on peut essayer de réaliser le prototype d'une des solutions basées guidage flexible pour aller vers un début de conception et tester la faisabilité.

Références

- [1]
- [2] Johan Bertrand, Arda Yiğit, and Sylvain Durand. Embedded event-based visual odometry.
- [3] Benjamin Calmé, Lennart Rubbert, and Yassine Haddab. Towards a compact and low-cost mesoscopic xy positioning system using 3d printing of conductive polymers.
- [4] Guimin Chen, Quentin T. Aten, Shannon Zirbel, Brian D. Jensen, and Howell Larry. A tristable mechanism configuration employing orthogonal compliant mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2 :1–6, 2 2010.
- [5] Qiao Chen. Microrobotique numérique fondée sur l'utilisation de modules bistables : conception, fabrication et commande de modules monolithiques.
- [6] Sylvain Durand, Bruno Boisseau, Nicolas Marchand, and J Fermi Guerrero-Castellanos. Event-based pid control : Application to a mini quadrotor helicopter, 2018.
- [7] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. Further results on event-based pid controller. pages 1979–1984. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3 2014.
- [8] Guillermo Gallego, Tobi Delbruck, Garrick Orchard, Chiara Bartolozzi, Brian Taba, Andrea Censi, Stefan Leutenegger, Andrew J. Davison, Jorg Conradt, Kostas Daniilidis, and Davide Scaramuzza. Event-based vision : A survey, 1 2022.
- [9] Yannik Goergen, Romol Chadda, Rouven Britz, Dominik Scholtes, Nataliya Koev, Paul Motzki, Roland Werthschützky, Mario Kupnik, and Stefan Seelecke. Shape memory alloys in continuum and soft robotic applications. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2019.
- [10] Hussein Hussein, Patrice Moal, Gilles Bourbon, Yassine Haddab, Philippe Lutz, and Philippe Lutz Modeling. Modeling and stress analysis of a pre-shaped curved beam : Influence of high modes of buckling, 2015.
- [11] Hussein Hussein, Chalvet Vincent, Le Moal Patrice, Bourbon Gilles, Haddab Yassine, and Lutz Philippe. Design optimization of bistable modules electrothermally actuated for digital microrobotics. 2014.
- [12] Patrick Lichtsteiner, Christoph Posch, and Tobi Delbruck. A 128 × 128 120 db 15 s latency asynchronous temporal contrast vision sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43 :566–576, 2 2008.
- [13] M. Litzenberger, C. Posch, D. Bauer, A. N. Belbachir, P. Schön, B. Kohn, and H. Garn. Embedded vision system for real-time object tracking using an asynchronous transient vision sensor. pages 173–178. IEEE Computer Society, 2006.
- [14] F. Perez-Pena, T. Delbruck, S. C. Liu, A. Linares-Barranco, and G. Jimenez-Moreno. Event-based control system on fpga applied to the pencil balancer robotic platform. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 10 2015.
- [15] Alissa Potekhina and Changhai Wang. Review of electrothermal actuators and applications, 12 2019.
- [16] Jean Soudier, Sacha De Sousa, and Sylvain Durand. Fully event-driven control architecture, application to visual servoing of a ball-on-beam system.
- [17] Chalvet Vincent. Conception, réalisation et commande d'un microrobot numérique, planaire, non-redondant et en technologie mems, 2013.
- [18] D. H. Wang, Q. Yang, and H. M. Dong. A monolithic compliant piezoelectric-driven microgripper : Design, modeling, and testing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 :138–147, 2013.

- [19] Mohamed Zanaty, Ilan Vardi, and Simon Henein. Programmable multistable mechanisms : Synthesis and modeling. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 140, 4 2018.
- [20] Yangkun Zhang, Yuxin Peng, Zhenxing Sun, and Haoyong Yu. A novel stick-slip piezoelectric actuator based on a triangular compliant driving mechanism. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66 :5374–5382, 7 2019.
- [21] Zhuo Zhang, Yueqing Yu, Xinyu Liu, and Xuping Zhang. Dynamic modelling and analysis of v- and z-shaped electrothermal microactuators. *Microsystem Technologies*, 23 :3775–3789, 8 2017.