

Kilobot
Cahier des charges

GUERMONT Arnaud, BIELLE Benjamin

24 avril 2015

Sommaire

1	Introduction	3
	Contexte	3
	L'existant	3
	Veille Technologique	4
2	Contraintes	5
	Matérielles	5
	Communication et perception de l'environnement	5
	Mesure de la distance	6
	Déplacement	6
	Contrôle des robots par l'opérateur	6
	Coûts	7
	Logicielles	8
	Simulation	8
	Firmware	9
3	L'API	10
	Description des attentes	10
	Implémentation	10
	Première Approche	10
	Seconde Approche	11
	Fonctions de l'API	11
4	Déroulement du projet	13
	Phase I	13
	Phase II	13
5	Annexe	14
	Matériel Utilisé	14
	Logiciel Utilisé	14
	Tutoriels	14
	Installation du contrôleur	14
	Flashage du contrôleur et des kilobots	15
	Chargement d'un nouveau firmware	16
	Calibrage des kilobots	16

Table des figures

3.1 Première Approche 12

Chapitre 1

Introduction

Maîtrise d'oeuvre : DUBOIS Swan.

Maîtrise d'ouvrage : GUERMONT Arnaud, BIELLE Benjamin.

Contexte

Kilobot est une plate-forme constituée de petits robots autonomes. Cette plate-forme est proposée par l'université d'Harvard¹.

Ces robots se déplacent uniquement par vibration et communiquent par infrarouges.

Le but de ce projet est d'implémenter une **API** permettant de manipuler des modèles robotiques sur la plate-forme Kilobot. Ces modèles ne sont pas prévus pour la plate-forme Kilobot, notre API devra rendre cette implémentation possible en restant simple et si possible facilement extensible.

L'existant

Il existe deux API de base pour la plate-forme Kilobot.

- ***K-team***².
- ***Kilobotics***³.

Celle proposée par ***K-team*** (fournie par défaut avec les robots) nous permet une moins grande liberté que celle de ***Kilobotics***.

Donc notre **API** se basera sur celle-ci car elle nous garantit une plus grande liberté, portabilité et extensibilité.

1. <http://www.eecs.harvard.edu/ssr/projects/progSA/kilobot.html>
2. <http://www.k-team.com/mobile-robotics-products/kilobot>
3. <https://www.kilobotics.com/>

Veille Technologique

Il existe plusieurs projets similaires aux kilobots, par exemple le projet ***I-Swarm***⁴, mais seul la plate-forme ***Kilobot*** permet de manipuler des centaines de robots de manière réaliste hors d'un simulateur.

4. <http://www.hizook.com/blog/2009/08/29/i-swarm-micro-robots-realized-impressive-full-system-integration>

Chapitre 2

Contraintes

Matérielles

Le but du modèle est de représenter une grande quantité de robot (presque un essaim) pour pouvoir effectuer des tâches collectives qui seraient impossible à réaliser en solitaire. De nombreux exemples dans la nature mette en action ce principe : les fourmis peuvent explorer des zones d'un périmètres de plusieurs kilomètres par exemple.

Dans la robotique, il existe des algorithmes divers telle-que l'auto-assemblage, les constructions collectives ou encore l'exploration.

Ces algorithmes sont fait pour être testé sur plusieurs centaines voir milliers d'individus. Cependant, pour des raisons de coûts, de temps ou encore de complexité, il est parfois uniquement possible de les validés en simulation.

C'est pourquoi un modèle comme celui que les kilobots implémente fut crée. Les robots devaient avoir plusieurs capacités : communiquer et percevoir leur environnement par l'intermédiaire de capteurs, connaître la distance entre eux et se déplacer en avant, tourner sur la gauche et sur la droite. De plus, ils devaient aussi pouvoir tous être contrôlé ensemble simultanément par un seul opérateur. Mais la principale contrainte restait le coût. En effet, il était très dur auparavant de tester des algorithmes sur des essaims de robots qui coûtait plusieurs centaines de dollars à l'unité.

Communication et perception de l'environnement

De nombreux algorithmes collectifs utilise la communication entre robots et la distance entre ces même robots pour piloter individuellement le comportement de chaque robot. Il est donc indispensable que les kilobots puissent communiquer entre eux ainsi que mesurer la distance qui les sépare l'un de l'autre.

Pour qu'ils puissent communiquer, chaque kilobot est pourvus d'une led pour transmettre et d'une photodiode infrarouge comme récepteur qui sont tous les deux placés en-dessous au centre du robot. En étant placé au centre, le récepteur peut recevoir des messages d'une égale distance dans toutes les directions. Les messages sont envoyés par la led et utilisent la réflexion du support sur lequel ils évoluent pour transmettre (c'est pourquoi le support doit être réfléchissant comme un tableau blanc ou un miroir par exemple). En utilisant cette technique, un kilobot peut transmettre dans un rayon de 7 centimètres à un débit de 30 kb/s. La méthode d'accès CSMA/CA est utilisés pour éviter les collisions (tous les robots émettent sur le même canal).

Une led RGB est aussi situé sur le côté pour pouvoir informer l'utilisateur.

Les kilobots sont aussi pourvus d'un capteur de lumière permettant de mesurer l'intensité lumineuse de l'environnement du robot.

Mesure de la distance

Le calcul de la distance entre un robot et un autre se fait via l'envoi et la réception du message. L'intensité de la lumière émise par la led diminue proportionnellement avec la distance qu'elle parcourt. Ils ne restent alors plus qu'au récepteur à calculer la distance en fonction de l'intensité du signal reçu. Comme le signal peut être affecté par l'environnement, la précision est de ± 2 mm.

Déplacement

L'une des principales capacités des robots est de pouvoir se mouvoir dans leur environnement. L'une des solutions les plus simples et efficace est d'utiliser un design à deux roues, chaque roue étant contrôlé par un moteur. Mais cette solution est aussi très chère et ne permettra pas de réaliser un robot à bas coûts.

Pour y remédier, les kilobots disposent de trois jambes rigides et de deux moteurs à vibration disposés de chaque côté du robot. Lorsqu'un des moteurs est activé, il génère une force centripète qui est convertie en une force vers l'avant transmise à la jambe située en dessous du moteur. Grâce au positionnement décentré de chaque moteur, la mise en marche de l'un ou l'autre va causer une rotation vers la gauche ou la droite en fonction du moteur. En activant les deux moteurs en même temps et en contrôlant la magnitude de leur vibration, il est alors possible de faire avancer le robot en ligne droite vers l'avant. Il peut ainsi se déplacer à une vitesse d'environ 1 cm/s et pivoter à environ 45° /s.

Contrôle des robots par l'opérateur

Lorsqu'on utilise un très grand nombre de robots, le chargement de leur programme, leur mise en marche ou encore le rechargement de leur alimentation peut vite prendre beaucoup de temps pour l'utilisateur : Émettons l'hypothèse qu'il faille 3 secondes pour allumer un robot via un interrupteur. Pour un groupe de 1000 robots, cela prendrait au total 50 minutes, ce qui est bien trop long pour être efficace. Les kilobots sont donc conçus pour être utilisés à grande échelle par une seule personne.

La communication entre l'opérateur et les robots passe par un contrôleur. Le contrôleur est une plate-forme disposant d'une connexion USB pour interagir avec l'ordinateur de l'utilisateur et de multiples LEDs pour envoyer des messages aux kilobots. Chaque kilobot dispose sur son dos d'un récepteur pour la réception des signaux. Le contrôleur est l'interface entre l'opérateur et l'essaim de robot. Disposé à une hauteur d'un mètre, il couvre un périmètre d'un mètre. Il permet d'effectuer multiples opérations comme la mise en veille, le réveil, le chargement d'un nouveau programme ou encore l'arrêt du programme en cours d'exécution. Il est aussi utilisé pour la calibration des moteurs des kilobots.

Le problème évoqué auparavant aurait aussi pu s'appliquer aux kilobots. Pour y remédier, les robots disposent d'un mode veille. Le microcontrôleur peut désactiver le régulateur de tension pour les moteurs et aussi celui pour le système de communication (LED et récepteur). Il ne reste plus que celui pour le microcontrôleur principal. Dans cet état de veille, le microcontrôleur va tester toutes les minutes

pendant 10 ms si il a reçu un message de réveil. Si c'est le cas, il réalimente alors les régulateurs de tension et le robot redevient de nouveau opérationnel. Ce mode veille permet à un kilobot d'avoir une autonomie de 3 mois. Mettre en veille un groupe ne prend que quelques secondes et le réveil s'effectue en moins d'une minute. Les kilobots disposent aussi d'un interrupteur coupant toute alimentation du robot si ces derniers venaient à ne pas être utilisés pendant une longue période.

Le rechargement de l'alimentation des robots est aussi un facteur de temps. Les kilobots disposent d'une batterie au lithium-ion de 3.4 V 160 mAh. Elle leur assure une autonomie entre 3 et 24 heures selon l'usage qui en est fait. Le rechargement de celle-ci est aussi adapté à la manipulation d'un grand nombre de robots. Pour cela, les kilobots utilisent deux de leurs trois jambes comme conducteur : L'utilisateur place les jambes des robots en contact avec un courant électrique de 6V via une plaque métallique ou un tube métallique et connecte le crochet situé sur le dessus du robot à la masse. Cela permet le rechargement de plusieurs kilobots simultanément sans intervention sur le robot. Par exemple, l'utilisation d'une plaque métallique comme chargeur et d'une autre plaque qui viendrait se poser au dessus des kilobots est une solution abordable et adaptable à très grande échelle. Lorsque le chargement est terminé, la led RGB des kilobots en informe l'utilisateur.

Le chargement d'un programme s'effectue via le contrôleur. Lorsque l'opérateur souhaite charger un nouveau programme, il envoie un message au kilobot pour qu'il place son pointeur de programme dans le bootloader. Ce dernier dispose d'un programme qui va alors recevoir le nouveau programme de l'utilisateur et le placer dans la mémoire primaire. Le bootloader va ensuite vérifier que ce programme ne dispose pas d'erreur puis ensuite redémarrer le kilobot qui va alors exécuter le nouveau programme. Cette méthode permet de programmer un essaim de robots en environ 35 secondes.

Coûts

La principale contrainte lorsqu'on implémente un modèle à large échelle est le coût. En effet, les robots actuels dépassent les centaines de dollars à l'unité et ne sont donc pas envisageables.

Les kilobots ont été conçus dans le but de ne pas être chers à construire. Le coût à l'unité pour 1000 robots est de 14 dollars, ce qui est environ dix fois moins que les autres robots conçus pour les algorithmes collectifs.

Pour cela, les robots disposent d'un moyen de locomotion par vibration comme vu auparavant et sont constitués de pièces simples et peu coûteuses :

- Déplacement : 3,12 \$
- Alimentation : 3,61 \$
- Communication/Capteur : 2,20 \$
- Contrôleur : 2,83 \$
- Structure : 1,55 \$
- Divers : 0,74 \$
- Total : 14,05 \$

L'assemblage des robots est aussi très simple et rapide (la plupart des composants sont montés à la surface du PCB) et peuvent être réalisés par un robot pour un coût d'environ 5 \$ par robot (pour 1000 robots). Cela prend donc environ 5 minutes pour obtenir un robot fonctionnel à partir des composants.

Logicielles

Simulation

Lorsqu'on implémente des algorithmes collectifs, on désire parfois les simuler avant de pouvoir les tester grande nature sur les robots (ici les kilobots) afin d'éviter les erreurs d'implémentation ou de se retrouver avec un programme qui implémente mal l'algorithme.

Pour cela, nous avons à notre disposition le simulateur V-Rep de la société Coppelia Robotics qui est un simulateur spécialisé dans le domaine de la robotique. Il implémente des modèles 3d de l'ensemble des robots existants et il intègre aussi un créateur de modèle 3d afin de pouvoir simuler des prototypes. Il dispose aussi d'un moteur physique permettant de vérifier la viabilité de certains robots. Il utilise un langage de script (le Lua) pour programmer les robots et ainsi les faire évoluer dans l'environnement simulé. Il peut aussi être couplé avec de nombreuses interfaces via des API remotes.

Le modèle 3d des kilobots fut implémentés par la K-Team dans le simulateur et permet la simulation de l'ensemble des fonctionnalités des robots. Il existe deux implémentations : avec et sans capteur de lumière. En effet, la simulation du capteur de lumière nécessite des calculs supplémentaires et allonge la durée de la simulation. Il n'est donc pas utile qu'il soit utiliser si l'algorithme n'en n'a pas besoin.

Le contrôleur est aussi simulé dans V-Rep via son propre modèle 3d. Il permet de lancer le programme, arrêter le programme en cours et aussi de connaître le niveau de batterie simulé.

L'ensemble de l'API de la K-Team est implémenté dans le simulateur via un squelette de code inclus dans chaque script associé à un objet kilobot.

Malheureusement, le simulateur V-Rep ne répond pas à nos besoins pour la simulation d'algorithme collectif sur les kilobots. Plusieurs problème furent rencontrés :

Le langage utilisé pour les script est le Lua. Bien que très similaire au langage C, il nous oblige à retranscrire chaque programme en Lua. De plus, le fichier contenant le script en lua est incorporé dans le fichier contenant la scène du simulateur (la scène comprend les modèle de robot simulé, l'environnement ainsi que l'ensemble des scripts). C'est à la fois un avantage (partage d'une simulation très facile : tout est regroupé dans un seul fichier) et un inconvénient (obligé de partager l'ensemble de la scène pour pouvoir travailler en groupe et ne pas pouvoir travailler sur le script sans installer ou exécuter le simulateur).

Le simulateur dispose lors de la simulation de plusieurs vitesse de simulation. Il est alors utile de pouvoir accélérer le temps pour voir si l'implémentation de l'algorithme est robuste et stable. Sauf que l'augmentation de la vitesse de simulation engendre des bugs dans le déroulement des scripts et ne permet pas de s'assurer du bon fonctionnement d'un programme de manière fiable.

Enfin, V-Rep est un simulateur orienté mécanique. Il dispose en effet d'un moteur physique et d'un environnement en 3 dimensions pour pouvoir simuler des robots complexes comme des bras robotiques. Nous l'utilisons pour effectuer des simulations d'algorithmes, donc comme un simulateur logique. Il n'est alors pas adapté à nos besoins (trop lourd, langage de script trop contraignant, nombreux bug durant la simulation).

Firmware

Les kilobots sont un modèle de robot développés par l'université d'Harvard. L'entreprise suisse K-Team Corporation les propose à la vente et s'occupe de la fabrication et de l'assemblage. Ils fournissent les robots avec leur propre firmware développé en interne par la K-Team.

Ce firmware possède un inconvénient : il n'est compatible uniquement sous windows.

En effet, pour que l'opérateur puisse charger le programme dans les kilobots, il doit passer par le contrôleur qui est l'interface entre l'ordinateur et les robots. Or, le driver du contrôleur est uniquement disponible pour Windows et la K-Team ne fournit pas les sources pour un portage sous Linux.

De plus, nous avons rencontrés des problèmes lors de la calibration des moteurs avec le firmware d'origine. Ce dernier ne permet la calibration uniquement du moteur gauche ou du moteur droit mais pas des deux lorsqu'on souhaite avancer. Or, le positionnement des jambes de chaque kilobot n'étant pas parfaitement identique, nous avons besoin de valeurs différentes pour les deux moteurs afin que le robot se déplace en ligne droite.

Après recherche, nous décidâmes d'utiliser le firmware kilobotics. Kilobotics est le nom de la librairie développée par l'université d'Harvard. Il est open-source et est plus récent et dispose d'un driver pour Linux. De plus, son utilisation limite les risques pour le matériel. Le contrôleur permet de charger les programmes dans les kilobots. Mais pour effectuer cela avec le firmware d'origine de la K-Team, il faut à chaque nouveau programme reprogrammer le microcontrôleur du contrôleur, ce qui implique le risque de se retrouver avec un microcontrôleur mal programmer et alors un contrôleur potentiellement hs. Le firmware kilobotics nécessite lui de ne le reprogrammer qu'une seule fois, ce qui limite grandement les risques.

En ce qui concerne la calibration, kilobotic permet via l'interface graphique (kilogui) de calibrer chaque moteur séparément mais aussi de leur attribuer des valeurs différentes pour le déplacement en ligne droite. Kilogui propose aussi la possibilité de rentrer directement les valeurs souhaitées (entre 1 et 255) pour la puissance des moteurs. Enfin, il est possible d'affecter un identifiant à chaque robot qui sera stocké dans la mémoire EPROM.

Chapitre 3

L'API

Description des attentes

Le projet doit permettre de créer une API simulant un autre type de modèle robotique sur la plate-forme Kilobot.

Ce modèle se nomme : **modèle CORDA**.

Le modèle CORDA nous impose quelques contraintes, ces contraintes portent sur l'aspect physique des robots, on peut les résumer de la façon suivante :

- chaque robot possède un repère orthonormé.
- chaque robot possède une vision "infinie".
- chaque robot ne possède aucun moyen de communiquer avec ses congénères.
- chaque déplacement du robot est précis.

Ces contraintes posent plusieurs problématiques. En effet la plate-forme Kilobot ne propose aucune de ces contraintes. (cf chapitre précédent)

Donc comment simuler une vision "infinie" avec la plate-forme Kilobot ? Comment simuler un axe orthonormé ? Comment localiser les robots les uns par rapport aux autres ? Et plus important comment un robot peut se localiser dans l'espace ?

Implémentation

Nous pouvons résoudre le problème de la localisation dans l'espace (ainsi que la localisation par rapport aux autres) et de l'axe orthonormé en utilisant la méthode de la trilatération. Les robots Kilobot ne possèdent pas de caméra et ont une portée de communication limitée ce qui nous ne permet pas d'implémenter une vision infinie à proprement parler.

Première Approche

Nous pouvons, de manière naïve, résoudre le problème de localisation des robots en disposant des balises sur un cercle de diamètre 14cm (cf figure : 3.1).

Chaque point de la figure représente une balise, et les cercles permettent de visualiser les zones de communications.

Nous remarquons que l'ajout de cinq balises sur le cercle nous permet pas de recouvrir de manière optimale la zone (intérieur du cercle) donc nous doublons le nombre de balises.

Cela permet effectivement de couvrir toute la zone et de localiser de manière "précise".

Notre approche résout le problème de la localisation mais pose un autre problème. Comment augmenter la zone de travail ?

En effet, la zone couverte permet de faire fonctionner correctement seulement deux kilobots.

Donc notre approche n'est pas viable pour simuler le modèle CORDA sur la plate-forme Kilobot.

Seconde Approche

La première approche résolvait le problème de localisation et de positionnement, mais ne permettait pas de faire fonctionner plus de deux robots de manière viable.

Donc notre deuxième approche devra, elle aussi, résoudre le problème de localisation et de positionnement mais devra, par contre, agrandir la zone de travail des robots (par exemple de permettre à 6 robots ou plus d'être dans la zone de travail sans se gêner).

Nous pouvons utiliser la méthode dite de "bounding box" mais cette méthode augmenterait le nombre de balises par rapport au nombre de robots utiles de manière trop importante (du fait de la faible distance de communication des Kilobots).

Nous pouvons utiliser la méthode de multilatération qui ne demande que trois balises et ne demande pas une connectivité directe avec les balises (la distance est estimée grâce à la propagation d'un gradient) mais cette méthode pose le problème de la puissance de calcul, en effet la plate-forme Kilobot offre une puissance de calcul limitée ne permettant pas d'implémenter cette méthode.

La solution serait de proposer une méthode hybride entre ces deux méthodes, soit la méthode de "bounding box" avec la distance estimée avec un gradient.

Cette solution permettra à terme d'agrandir la zone de travail mais aura comme conséquence une perte de précision.

Fonctions de l'API

L'API devra fonctionner sur tous types de systèmes (*Windows*, *OSX*, *Linux*) et doit être extensible afin de faciliter l'ajout de futures fonctionnalités.

La première version de l'API ne proposera que les méthodes suivantes :

getPosition qui permet à un robot de connaître sa position.

toPosition qui permet à un robot de se rendre aux coordonnées en paramètre.

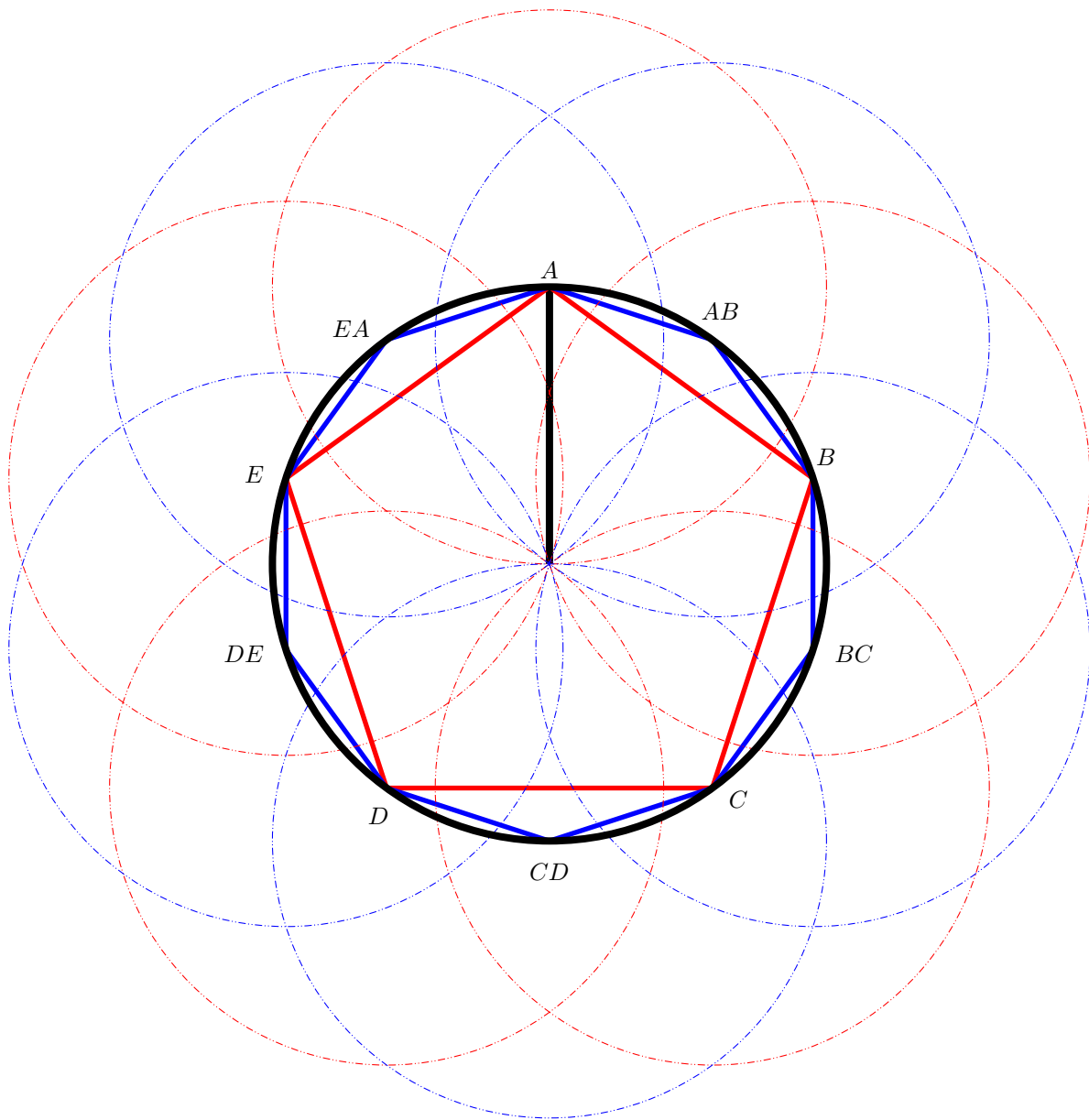


FIGURE 3.1 – Première Approche

Chapitre 4

Déroulement du projet

Ce projet se découpe en 3 phases.

Phase-I *Recherche Documentaire et Prise en main.*

Phase-II *Recherche d'un bio-algorithme et développement.*

Phase-III *Implémentation d'un modele de robot avec les kilobots.*

Phase I

La phase I ne comprenant que de la recherche documentaire et la prise en main de la plate-forme, la répartition se deroula ainsi, Arnaud prit en main la plate-forme et Benjamin la recherche documentaire.

Phase II

La phase II demandant plus de réflexion, nous mîmes nos compétences acquises à la première phase en commun afin de proposer un bio-algorithme digne d'intérêt. Notre bio-algorithme se base sur le principe de phototaxis.

Réaction de locomotion d'organismes mobiles provoquée par la lumière et qui les porte soit à s'en approcher (phototaxie positive), soit à s'en éloigner (phototaxie négative).

La première version de notre algorithme ne permet pas une entraide des kilobots, c'est à dire que chaque robot suit son programme sans se soucier des autres. Cette version ne permet donc pas à un essaim en formation de suivre la lumière tout en gardant cette formation.

Chapitre 5

Annexe

Matériel Utilisé

Le matériel se compose des kilobots, de transmetteur et d'un PC quelqu'il soit.

Logiciel Utilisé

Nous utiliserons les logiciels fournis pour l'API Kilobotics pour le développement de notre API, notre gestionnaire de version sera Github.

Le projet sera hébergé sous l'organisation **LSDev8**¹.

Nous utilisons (au début du projet) pour nos simulations le logiciel **V-Rep**² mais celui-ci se révéla trop contraignant dans son utilisation donc nous optâmes pour le logiciel **kbsim**³ car celui-ci est un simulateur exclusivement pour kilobot (une copie de ce logiciel se trouve aussi sur l'organisation **LSDev8**).

Tutoriels

Installation du contrôleur

Le contrôleur exploite un microcontrôleur Atmega m328p. Lors de la première connexion du contrôleur à un ordinateur Windows, Windows va automatiquement aller télécharger les drivers correspondant via windows update et les installer. Il n'y a pas d'autre opérations à faire. Sous Linux, aucun driver n'est nécessaire.

Si vous utilisez le firmware original de la K-Team, il vous faudra alors installer pour Windows un driver supplémentaire afin de faire communiquer l'interface graphique avec le contrôleur. Pour cela, suivez les instructions fournis dans le manuel de la K-Team.

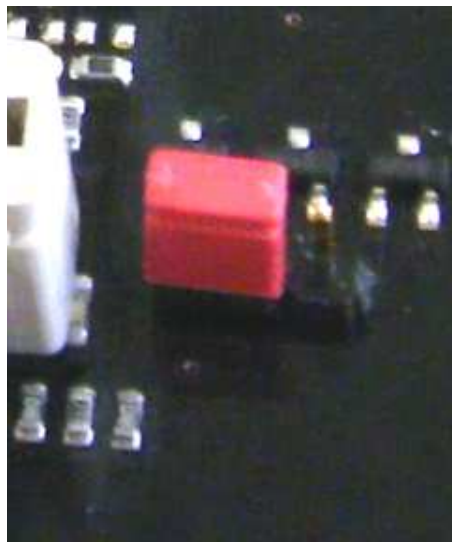
Problème

-
1. <https://github.com/LSDev8/>
 2. <http://www.coppeliarobotics.com>
 3. <https://github.com/ajhalme/kbsim>

Si le contrôleur n'est pas reconnu par windows, assurer vous qu'il apparaît bien dans le gestionnaire de périphérique.
Il doit normalement apparaître comme un Serial Port (FTDI) et un AVRisp mkII (Jungo).

Flashage du contrôleur et des kilobots

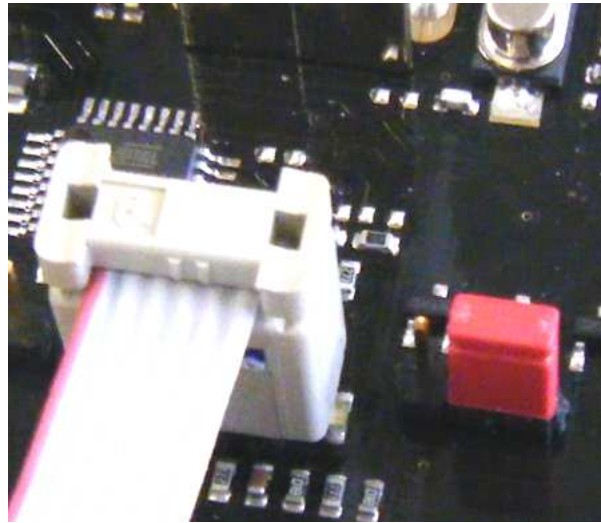
Si vous désirez passer au firmware kilobotics, il est nécessaire d'utiliser le logiciel AvrDude. Ce logiciel développer par Atmel permet de reprogrammer le microcontrôleur du contrôleur. Pour cela, connecter le contrôleur à un ordinateur via un cable usb, ouvrir un terminal et placez-vous dans le répertoire contenant le nouveau firmware (au format .hex) puis assurez-vous que le cavalier du contrôleur est bien positionné en mode interne (c'est la position par défaut : c'est à dire sur la gauche).



Enfin, exécuter la commande suivante :

```
avrdude -p m328 -P usb -c avrispmkII -U "flash:w:controller.hex:i"
```

Pour flasher les kilobots, l'opération est très similaire. Connecter le contrôleur, ouvrir un terminal et placez-vous dans le répertoire contenant le nouveau firmware (toujours au format .hex). Placez cette fois-ci le cavalier du contrôleur en mode externe (sur la droite) :



Puis connecter le câble au contrôleur et au kilobot via les 6 trous présent sur le côté du kilobot. Enfin, exécuter la commande suivante :

```
avrdude -p m328p -P usb -c avrispmkII -U "flash:w:bootloader.hex:i"
```

Problème

Si AvrDude ne reconnaît pas le contrôleur, assurez vous d'avoir positionné le cavalier dans la bonne position. Sinon, la connexion entre le connecteur du câble et le kilobot est très sensible. Il faut que toutes les broches du connecteur soit en contact avec le kilobot. N'hésitez surtout pas à presser légèrement le connecteur contre le kilobot et à le placer légèrement en biais afin d'assurer la bonne connexion entre le connecteur et le robot.

Chargement d'un nouveau firmware

Calibrage des kilobots

Bibliographie

- [1] Alejandro Cornejo and Radhika Nagpal. Long-lived distributed relative localization of robot swarms. *CoRR*, abs/1312.1915, 2013.
- [2] Yoann Dieudonné, Ouiddad Labbani-Igbida, and Franck Petit. Circle formation of weak mobile robots. In AjoyK. Datta and Maria Gradinariu, editors, *Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*, volume 4280 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 262–275. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] YuriK Lopes, AndréB Leal, TonyJ Dodd, and Roderich Groß. Application of supervisory control theory to swarms of e-puck and kilobot robots. In Marco Dorigo, Mauro Birattari, Simon Garnier, Heiko Hamann, Marco Montes de Oca, Christine Solmon, and Thomas Stützle, editors, *Swarm Intelligence*, volume 8667 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 62–73. Springer International Publishing, 2014.
- [4] Ichiro Suzuki and Masafumi Yamashita. Distributed anonymous mobile robots : Formation of geometric patterns. *SIAM Journal on Computing*, 28 :1347–1363, 1999.