

RÉSUMÉ CONSOLIDÉ

ANR ANCOR : Algorithm Design for Microrobots with Energy Constraints

ANR14-CE36-0002-01

Titre d'accroche : Etudier l'impact des contraintes énergétiques pour les équipes collaboratives de micro-robots mobiles autonomes.

1 L'objectif général : Algorithmes éco-énergétiques, coordination et répartition des tâches entre micro-robots, sans ou avec connaissance du réseau

Ce projet développe des algorithmes pour la conservation de l'énergie et la planification basée sur les limitations énergétiques des robots individuels dans un essaim distribué de micro-robots. Nous envisageons des tâches collaboratives pour les équipes de robots mobiles, telles que la recherche et l'exploration, la livraison collaborative, la collecte de données et les problèmes de formation de robots. Nous avons calculer les limites sur les besoins énergétiques de robots et de la taille de l'équipe pour ces diverses tâches. Nous avons commencer par trouver des résultats de complexité sous contraintes énergétiques et ensuite nous avons développer des algorithmes approximatifs pour résoudre ces tâches en respectant les limitations énergétiques ainsi que d'autres limitations de la modèle.

Dans le cas *offline*, quand le réseau est connu en avance, nous avons étudié le problème de la livraison collaborative d'un colis de la source à la destination par de nombreux robots. Plusieurs versions du problème ont été étudiées selon les modèles différentes : (1) Quand les robots doivent retourner à leur base, (2) Quand le chemin de livraison est fixe (3) Quand les robots sont pas homogènes et ils consomment de l'énergie à des rythmes différents. Certaines versions du problème sont difficiles à résoudre, mais dans ces cas, nous avons présenté une preuve de dureté et des limites inférieures d'approximabilité. Nous avons également étudié la tâche fondamentale de rassembler les robots sous les contraintes de limitations énergétiques. Dans le cas *online*, lorsque le réseau est initialement inconnu, nous nous sommes concentrés sur le problème de l'exploration collective par une équipe de robots; c'est une tâche primitive qui peut être utilisée pour résoudre d'autres problèmes dans ce contexte.

2 Les méthodes et technologies utilisées : Algorithmes d'approximation, réductions de dureté, algorithmes géométriques, algorithmes en ligne

Dans ce projet, nous concevons des algorithmes *sensibles à l'énergie* pour des tâches distribuées exécutées par une équipe de robots. Étant donné que chaque robot a une limite individuelle d'énergie disponible, nous devons trouver des moyens d'équilibrer le travail entre les robots afin que chaque robot puisse accomplir sa tâche sans perdre toute son énergie. En fonction du scénario particulier, du placement des robots et de leurs réserves de puissance individuelles, l'algorithme doit faire des choix conscients sur le mouvement des robots et l'ordre dans lequel les robots doivent être déployés. Les techniques développées au cours de ce projet peuvent être appliquées à une variété de tâches qui nécessitent une collaboration entre plusieurs micro-robots mobiles à énergie limitée.

Nous développons également un algorithme éco-énergétique pour des équipes de robots hétérogènes ayant des taux de consommation d'énergie distincts. Pour cela, nous subdivisons la tâche de livraison collaborative en trois sous-tâches, la collaboration, la planification individuelle et la coordination : Tout d'abord, si plusieurs robots travaillent pour livrer le même colis, ils doivent collaborer, c'est-à-dire que nous devons trouver tous les lieux intermédiaires de dépôt et de retrait du colis. Deuxièmement, si un de robots travaille sur plusieurs packages, nous devons planifier dans quel ordre il souhaite aborder son sous-ensemble de colis. Enfin, nous devons coordonner quel robot travaille sur quel sous-ensemble de colis (s'ils le font sans collaboration, les sous-ensembles forment une partition, sinon les sous-ensembles ne sont pas nécessairement disjoints par paires). Même si ces trois sous-tâches sont entrelacées, nous étudions séparément les problèmes de collaboration, planification et coordination avec le but d'obtenir les meilleures approximations pour chacun de ces sous-tâches, qui sont ensuite combinées pour obtenir la solution approximative finale.

3 Résultats majeurs du Projet :

1. Problème de livraison collaborative :

Le but est de livrer une ou plusieurs colis d'un noeud désigné source à un autre noeud désigné destination, par un équipe de robots avec les contraintes d'énergie individuelles. Nous avons trouver les résultats un peu surprenant que le problème est plus facile à résoudre dans le cas quand chaque robot doit retourner à son base (returning version) en comparaison du cas quand ils peuvent se terminer loin de sa base (non-returning version). Le premiere version du problem est facile à résoudre dans les arbres et nous avons un algorithme efficace pour livraison collaborative quand la topologie est un arbre. Par contre, dans le cas general, nous avons montrer que tous les deux versions du problèmes sont NP-dur, même si la topologie est un graphe planar (comme la plupart de réseau de transportation en réalité). Ensuite nous avons trouver les algorithmes à augmentation de ressources (resource-augmented) où on augment l'énergie de chaque robot par un petit facteur pour pouvoir résoudre la problème en temp polynomial. Nous avons calculer des bornés inférieures de l'augmentation d'énergie pour montrer que nos algorithmes sont les plus éco-énergétiques pouvant être calculés en temps polynomial.

Nous avons également résolu la version *Fixed-Path* du problème lorsque le chemin sur lequel le colis doit être transporté est donné à l'avance. Enfin, nous avons étudié le problème de la livraison collaborative pour les robots hétérogènes ayant des taux de consommation

d'énergie distincts ; l'objectif est de minimiser la dépense énergétique totale. Nous avons montré que le problème peut être facilement résolu pour un seul colis, mais la problème de livraison de plusieurs colis est NP-difficile, même si la topologie est un graphe planar. Pour la livraison multi-colis, nous avons fourni un algorithme d'approximation avec un facteur $4R$ lorsque le ratio entre les taux de consommation d'énergie de deux robots quelconques est borné par R .

2. Problème de formation de robots :

Nous étudions la tâche de rassemblement de k robots mobiles à énergie contraints dans un graphe pondéré (chaque arête a un poids qui correspond à l'énergie nécessaire pour traverser cet arête). Chaque robot est initialement placé sur un nœud arbitraire et il a une énergie limitée, ce qui limite la distance qu'il peut parcourir. Comme la rassemblement des robots sur un seul point devient impossible dans ce cas, nous étudions trois variantes de rassemblement approximative : Le but est de déplacer les robots et avoir une configuration qui minimise soit : (1) le rayon d'une balle contenant tous les robots, (2) la distance maximale entre deux robots quelconques, ou bien (3) la distance moyenne entre les robots. Nous prouvons que le version (1) est résoluble en temps polynomial et pour le version (2) nous avons une 2-approximation en temps polynomial avec une borne inférieure de NP-dureté correspondante. Pour le version (3) du problème, nous pouvons calculer en temps polynomial un algorithme d'approximation avec un facteur $(2 - 1/k)$. Nous avons également montrer qu'il n'y a pas de algorithmes FPTAS pour cette problème, sauf si $P = NP$. Nous avons présenter des résultats à l'approximation additive pour certaines de ces problèmes.

3. Problème d'exploration en ligne :

Nous considérons le problème de l'exploration d'un réseau inconnu (*Online Exploration*), par k robots mobiles, qui commence d'un seul nœud du graphe, où chaque robot a une contrainte sur sa consommation d'énergie qui limite le nombre d'arêtes qu'il peut traverser. Étant donné qu'un seul robot peut ne pas explorer complètement le graphique, les robots doivent collaborer afin que chaque nœud soit visité par au moins un de robots. Nous considérons trois critères d'optimisation différents : (1) la taille de l'équipe, (2) le limite d'énergie par robot, et enfin, (3) le nombre de nœuds visités.

En supposant que le limite d'énergie par robot est B , nous fournissons des algorithmes en ligne pour l'exploration d'arbres, avec ou sans retour à la base, optimisant le nombre de robots utilisés. Pour «l'exploration avec retour», nous fournissons des algorithmes avec une constant ratio de compétitivité, tandis que pour «l'exploration sans retour», nous présentons un algorithme avec un ratio de compétitivité $O(\log B)$. En effet nous montrons que c'est la mieux possible, car nous avons montrer une borne inférieure de $\log B$ sur le ratio de compétitivité pour tout algorithme d'exploration en ligne. Enfin, nous avons considéré la problème d'exploration maximale, c'est-à-dire de visiter la nombre maximum de nœuds lorsque le budget B , ainsi que la taille de l'équipe k sont fixés a priori. Pour le problème d'exploration maximale, nous fournissons un algorithme en ligne qui visite au moins un tiers du nombre de nœuds visités par tout algorithme d'exploration avec connaissance du graphe. Nous présentons également un borné inférieure de 2, 17 sur le ratio de compétitivité pour cette problème.

4 Production scientifique :

Publications multi-partenaires :

Nous avons publié plusieurs articles scientifique et donner les exposés aux conférences nationales et internationales pour diffuser les résultats du projet au monde scientifique. Pour le problématique de *livraison collaborative* (Collaborative Delivery Problem), nous avons travailler avec notre partenaire, nous avons publié deux articles, un à SIROCCO 2016 et l'autre à STACS 2017, les conférences internationales à haut niveau dans notre domaine de recherche. Ces deux articles résoudre le problème pour les équipe de robots mobiles homogène (chaque robots est limité par un borne sur l'énergie) ou hétérogène (les robots ont les taux de consommation différents). La version plus longue du premiere article était accepté pour publication dans le journal *Theoretical Computer Science*. Nous avons aussi écrit deux autres articles sur les problématique de "Near-Gathering" et "Fixed Path Delivery" respectivement. Ces articles vont apparaitre dans le prochaine edition de la conférence SIROCCO en 2019. Les versions longues de ces articles avec plus des détails vont publiées dans le journal *Theoretical Computer Science* prévus pour 2020.

Publications mono-partenaire :

Avec le postdoc (non-permanents du projet) et une thésard, nous avons publié deux articles, un à ALGOSENSORS (conférence internationale) et l'autre à ALGOTEL 2017 (le seule conférence francophone sur notre domaine) en 2017. Le premier article a étudié le problème de livraison dans le scénario où les robots peuvent partager leur énergie. Le deuxième est sur la problème de l'exploration maximale dans le cas quand le nombre de robots et leurs budgets énergétiques sont fixés à l'avance. Avec notre collaborateur externe, nous avons publié deux articles dans les conférences internationales (SIROCCO 2015 et ICALP 2018) et un article sur le journal scientifique *Theory of Computing Systems* qui present les résultats sur les versions différents du problème de l'exploration en ligne. Le porteur du projet M.Das a également donné plusieurs séminaires (en Angleterre, Italie, Japon) sur les résultats du projet et il a été invité à donner un exposé au sien d'un conférence internationale (Workshop on Self-organization in Swarm of Robots, Tokyo 2018) sur les résultat du projet.

5 Informations factuelles :

Le projet ANR ANCOR est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire d'Informatique et Système (LIS), Aix-Marseille Université et CNRS, situé à Marseille. C'est un projet bilatéral Franco-Suisse avec l'institute d'informatique fondamentale de ETH Zurich en Suisse comme partenaire. Le projet a commencé en 1er Juillet 2015 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 84.032,00 euros pour un coût global de l'ordre de 593.792,00 euros, pour la partie français du projet. Le partie Suisse a été financé par le SNF du Suisse, selon l'accord mutuel pour les projets bilatéraux. L'équipe française du projet à Marseille, était composée de trois chercheurs permanents, d'un postdoctorant et d'une doctorante financé par les fonds externes.