

Robotique en Essaim, Récents Résultats et Directions Futures

Julien Nembrini & Alcherio Martinoli
Swarm-Intelligent Systems Group
École Polytechnique Fédérale de Lausanne
CH-1015 Lausanne
prenom.nom@epfl.ch

Résumé - La robotique en essaim est un domaine émergent de la robotique qui s'intéresse aux systèmes multi-robots auto-organisés, souvent caractérisés par de grands nombres d'unités. Dans cet article, le domaine est détaillé en faisant le point sur les résultats obtenus jusqu'ici, ainsi qu'en illustrant quelques tendances futures. En particulier, une idée de l'état de l'art dans le domaine est donnée en résumant les résultats expérimentaux récents utilisant de vrais robots, ainsi qu'en décrivant certaines méthodes d'analyse et de synthèse en train de s'imposer dans la robotique en essaim. L'impression générale est celle d'un domaine vivant, en pleine évolution, centré sur l'ingénierie mais avec une forte ouverture vers les sciences naturelles, qui est pourtant encore loin d'avoir atteint sa maturité. Nous espérons que cette contribution soit en mesure de faire partager notre enthousiasme pour le domaine et montrer à la communauté robotique française l'intérêt scientifique et appliqué de ces systèmes robotiques.

Mots-clés - robotique en essaim, modélisation, synthèse de comportement, intelligence collective

I. INTRODUCTION

La robotique en essaim est un champ de recherche relativement nouveau qui s'intéresse à la coordination auto-organisée de systèmes multi-robots, et tout particulièrement à ceux qui consistent en un grand nombre d'unités dont la complexité est minimisée. Cette simplicité visée de l'élément robotique individuel permet d'envisager une miniaturisation, des réductions de coûts, une dégradation progressive plutôt que soudaine de la performance collective optimale face à un changement dynamique du nombre de robots, ainsi qu'une robustesse améliorée au niveau du système mais aussi des robots individuels. Originellement inspiré par des exemples naturels, principalement dus aux insectes sociaux [1], le champ de la robotique en essaim applique les principes de l'intelligence collective aux systèmes robotiques, dans le but de tirer parti de comportement globaux complexes émergeant des interactions locales entre les agents et l'environnement, perturbées par le bruit et la portée limitée de leurs moyens de perception, de communication et d'actuation.

Les applications potentielles de la robotique en essaim sont des contextes exigeant une miniaturisation extrême (nano-ou micro-robotique) ou nécessitant la coordination de larges

nombre de robots, comme par exemple des réseaux robotiques de perception distribuée. Les contextes présentant des contraintes de coût, de fiabilité ou de vitesse de calcul comme le déminage [2] ou la recherche de cibles [3] apparaissent aussi souvent comme justification.

La quasi-totalité de la recherche en robotique en essaim s'est initialement concentrée sur la *bio-inspiration*, à savoir l'implémentation de mécanismes biologiques au sein d'un collectif robotique. Si par exemple l'action de communiquer par l'entremise de signaux déposés dans l'environnement, la *stigmergie*, est essentielle pour expliquer les comportements des insectes sociaux et a été utilisée avec succès dans des systèmes robotiques [4], [5], la disponibilité de moyens de communication radio rend parfois le cadre strict de la bio-inspiration limitant. Ceci nous amène à penser que le champ de la robotique en essaim devrait se positionner au-delà de la bio-mimétique et tirer parti de la combinaison de principes naturels avec les connaissances de l'ingénierie et la technologie disponible.

Par contre, l'utilisation de systèmes robotiques collectifs peut servir comme validation d'hypothèses biologiques (par exemple [6]) même si la valeur ajoutée de ces systèmes reste controversée par rapport à des modèles numériques ou analytiques (voir [7] pour une discussion approfondie du sujet).

Pour terminer, une direction de recherche très prometteuse est celle des sociétés symbiotiques, où les robots infiltrent des collectifs animaux pour influencer sur leur comportement [8]. Dans ce cas les robots ne doivent pas forcément suivre un comportement bio-mimétique mais doivent avant tout être acceptés par les animaux. On peut considérer ces systèmes comme des "microscopes" embarqués interactifs, utilisables de manière peu invasive pour l'étude des sociétés animales. Contrairement aux exemples cités plus haut, ces dispositifs expérimentaux permettent de récolter des données sur les animaux tout en pouvant influencer leur comportement par l'entremise des robots.

Cet article présente un résumé des résultats récents dans le domaine des essais robotiques, tant du point de vue expérimental que du point de vue théorique. Étant donnée la nature multi-disciplinaire de ce champ de recherche, il ne sera pas tenté de présenter un relevé exhaustif des travaux en la matière mais plutôt de mentionner les publications à

notre avis les plus significatives et de discuter en quoi la robotique en essaim présente des propriétés spécifiques par rapport à d'autres systèmes multi-robots. Il sera aussi abordé les méthodes actuelles permettant de décrire et prédire les propriétés émergentes de ces systèmes, ainsi que les techniques utilisées pour construire et optimiser un système en essaim.

A. Propriétés des systèmes robotiques en essaim

Selon Bonabeau et al., l'intelligence collective repose sur l'auto-organisation des individus qui la composent [1]. Cette auto-organisation se définit par quatre composantes essentielles :

- un mécanisme d'amplification par rétroaction positive (par exemple le recrutement par phéromone),
- un mécanisme d'atténuation par rétroaction négative (par exemple l'évaporation du phéromone),
- des fluctuations aléatoires dues aux multiples sources de bruit ou à des choix probabilistes,
- des interactions multiples entre les individus et avec l'environnement.

Dans un système basé sur l'auto-organisation, les individus fonctionnent de manière autonome et leur action est influencée par la disponibilité d'une information au lieu d'en dépendre. De cette propriété découle une robustesse intrinsèque. L'efficacité du système réside dans l'équilibre entre exploration par fluctuations aléatoires et exploitation par amplification des comportements désirables.

Dans [4] et [9] sont présentés des expériences robotiques démontrant les 4 composantes citées plus haut. Si les exemples robotiques collectifs présentent toujours deux composantes de l'auto-organisation, à savoir les interactions et l'aléatoire, les rétroactions positive et négative sont parfois difficile à identifier dans des formes similaires à celles des systèmes naturels. En effet, la nature hybride des systèmes robotiques qui combinent des variables discrètes (logiques, numériques) et continues (analogues) permet des mécanismes de recrutement quasi-instantanés par la distribution d'information numérique (par exemple en utilisant un canal radio), qui rend la présence d'un mécanisme d'amplification continu, basé par exemple sur de multiples interactions physiques, superflu. En outre, parfois pour des raisons strictement liées à la tâche du système robotique, l'amplitude spatio-temporelle des processus auto-organisés peut être beaucoup plus limitée que celle de leur correspondants naturels. Par exemple, dans l'expérience d'extraction de tiges présentée dans [10], aucun mécanisme d'amplification n'est explicitement implémenté et l'augmentation de l'organisation du système résulte uniquement de schémas discrets et localisés de coordination. Un autre exemple de forme artificielle de coordination partiellement auto-organisée se trouve dans les algorithmes basés sur un système d'enchères [11].

En définitive, les formes naturelles et artificielles d'auto-organisation peuvent présenter des implémentations et expressions phénoménologiques relativement différentes, du fait de moyens d'interaction différents. La robotique en essaim se doit donc d'utiliser au mieux les technologies disponibles et se

départir de son origine bio-mimétique, qui, à la lumière de ces arguments apparaît plus historique que nécessaire.

II. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX RÉCENTS

Depuis l'expérience initiale de Beckers et al. [4], un grand nombre de recherches ont relaté des expériences se basant sur des postulats similaires, permettant aujourd'hui de considérer la robotique en essaim comme un champ de recherche en soi. Plusieurs plate-formes technologiques ont été développées, parmi lesquelles il est intéressant de citer le Khepera¹, l'e-puck² [12], le Jasmine³ et l'Alice [13] pour les plus miniaturisées.

En robotique, la conduite d'expériences est essentielle pour valider les résultats issus de modèles numériques ou analytiques. En effet, ceux-ci peuvent facilement occulter des paramètres fondamentaux du système réel et compromettre la validité d'une approche. En testant les algorithmes sur des plate-formes réelles, on est en mesure d'identifier de potentielles différences, permettant d'améliorer les modèles. L'état des expérimentations est donc significatif pour témoigner de l'avancée du champ de la robotique en essaim.

A. Comportements de base

Parmi les différents comportements en essaim, on peut identifier un certain nombre de comportements simples qui sont à la base des comportements plus complexes. Quatre de ces comportements ont été traités de manière systématique par la communauté : dispersion, agrégation, mouvement collectif et décision collective.

1) *Dispersion*: La dispersion contrôlée dans un environnement est une composante comportementale importante pour un essaim de robot, de par le fait que cette dispersion peut servir par exemple de réseau de communication [14] voire de senseur robotique distribué [15]. Dans ce dernier exemple, Schwager et al. démontrent la capacité d'un essaim de 50 unités de se disperser de manière optimale pour échantillonner une fonction de densité spécifique.

2) *Agrégation*: Beaucoup d'applications robotiques en essaim demandent aux membres de l'essaim de se regrouper, pour par exemple échanger des informations. Bien que beaucoup de recherches s'intéressent à l'agrégation, ces résultats sont principalement théoriques ou issus de simulations. Ceci est partiellement dû à la difficulté de répéter de nombreuses expériences pour recueillir des évidences statistiques, et partiellement au fait que les algorithmes disponibles restent encore peu efficaces à réunir l'essaim en une seule composante. Dans [16], un essaim de 10 Alice implémente un algorithme probabiliste issu de l'étude des cafards qui est en mesure de regrouper des robots sous un abri.

3) *Mouvement collectif*: Inspiré par le travail de Reynolds sur la modélisation des essaims d'oiseaux [17], le mouvement collectif est un autre comportement de base important. Du fait des limitations des dispositifs actuels de positionnement relatif

¹www.k-team.com

²www.e-puck.org

³www.swarmrobot.org

embarqué, l'implémentation de l'algorithme de Reynolds a souvent été problématique. Néanmoins, un exemple récent [18] présente un taux de rafraîchissement de 2 Hz permettant une vitesse des robots de 10 cm/s.

Dans le cadre du projet SwarmBot⁴ [19], il est présenté une forme de mouvement collectif basée sur un essaim physiquement connecté, qui permet la traversée par le collectif de larges vides qu'un seul robot ne saurait être en mesure de franchir.

4) *Choix collectif*: La possibilité pour un essaim de robot de récolter différentes observations de l'environnement en des localisations différentes et de les partager, permet d'augmenter la capacité de prise de décision des individus. Par exemple dans l'expérience de Garnier et al. [16] l'essaim est en mesure de préférer un abri capable d'abriter l'ensemble des robots.

B. Comportements combinés

Récemment, certains comportements combinés et plus complexes ont été identifiés pouvant être directement implémentés dans une variété d'applications ou pour des tâches bien spécifiques. Si jusqu'ici tous les exemples présentés évoluent dans un environnement bi-dimensionnel, des tentatives de robotique en essaim dans l'espace tri-dimensionnel ont été présentées, même si les résultats systématiques manquent encore [20].

1) *Exploration*: L'exploration implique la nécessité pour un essaim de robots de découvrir l'environnement. Un exemple où l'attribution de zones d'exploration se fait en utilisant le paradigme de la coordination par enchères est présenté dans [21].

2) *Couverture*: La couverture d'une région implique un passage systématique en tous les points. Cette tâche trouve son application dans les aspirateurs, ou les tondeuses à gazon. Une étude utilisant les robots Alice compare différentes méthodes de coordination, de la recherche aléatoire non-coordonnée à l'échange d'information topologique par radio tout en passant par des formes de couverture auto-organisées [22].

3) *Localisation de cible*: Une des applications majeures de la robotique en essaim est la recherche de cibles dans l'environnement. Cette tâche peut avoir de nombreuses variantes, dépendantes de la nature de la cible et de la manière de la localiser. Bien que beaucoup de recherche utilisant des modèles numériques ou analytique se préoccupent de la localisation de cibles, il y a encore peu d'exemples expérimentaux avec des systèmes multi-robots. [23] présente la localisation d'une source d'odeur par un essaim de robots.

4) *Manipulation collective*: Les exemples de manipulation collective se présentent soit sous la forme d'un transport collectif d'un unique objet [24], soit sous la forme d'une agrégation d'objets [25], [26] pour une ségrégation. Dans une expérience analogue, un essaim de robots est appelé à coopérer pour extraire des tiges de leurs emplacements [27].

5) *Fourragement*: Analogue à la recherche de cible, la tâche de fourragement, directement inspirée des fourmis, y ajoute la nécessité de ramener les cibles en un point. Krieger

et Billeter présentent une étude impliquant un essaim de 12 robots, comparant le bénéfice de différents types de communication [28], ou plus récemment [29].

III. ANALYSE DES SYSTÈMES ROBOTIQUES EN ESSAIM

L'analyse des systèmes robotiques en essaim peut se faire par l'étude quantitative et qualitative du comportement d'un système donné par l'acquisition systématique de données. Néanmoins, cette approche n'a aucun pouvoir prédictif ou de généralisation : il faut avoir le système spécifique à disposition au préalable. Aussi, dans un contexte d'ingénierie, il serait préférable de disposer de techniques d'analyse permettant de prédire le comportement d'un système avant sa construction. Bien que l'état de la recherche ne soit pas encore en mesure de présenter de tels modèles, plusieurs directions de recherches visent à améliorer la connaissance en la matière.

A. Niveaux d'abstraction

Une des difficultés principales de la modélisation de systèmes collectifs est leur spécificité par rapport à des systèmes précédemment considérés en robotique ou dans des disciplines scientifiques basées sur la modélisation telles que la physique statistique ou la biologie théorique. En effet, par rapport à des systèmes multi-robots traditionnels, les systèmes en essaim ont besoin d'une description statistique, de par leur grand nombre d'unités et leur coordination auto-organisée. De plus, par rapport aux sciences naturelles, la nature artificielle des éléments modélisés donne accès à des informations spécifiques et détaillées sur leur construction en mesure d'être intégrées au modèle. Par conséquent, il convient de considérer différents niveaux d'abstraction lors de la définition d'un modèle :

1) *Modèles microscopiques modulaires*: Ces modèles représentent chaque robot comme un ensemble de modules permettant d'y intégrer des informations spécifiques aux robots utilisés (nombre et types de senseurs, cinématique du véhicule, etc.). Ce niveau d'abstraction modélise les détails des processus internes au robot relatifs à la perception, l'actuation ou la communication. De tels simulateurs comme Webots [30] ou Gazebo/Player/Stage [31] sont devenus de quasi-standards qui permettent de choisir différents niveaux de réalisme.

2) *Modèles microscopiques individuels*: Situés un niveau plus haut dans l'abstraction, ce type de modèle représente les robots individuellement en considérant uniquement les mécanismes inter-robots et/ou leur interaction avec l'environnement et en simplifiant radicalement les détails intra-robot (par exemple, une suite de capteurs discrets avec la même fonctionnalité dans un modèle microscopique modulaire devient un capteur monolithique défini essentiellement par son rayon de perception dans un modèle microscopique individuel). En général il s'agit de modèles multi-agents qui ont besoin d'être résolus numériquement. Ce niveau d'abstraction permet de simplifier le nombre de variables à simuler et donc de procéder à des expériences systématiques beaucoup plus rapidement (plusieurs ordres de grandeur) par rapport à des modèles microscopiques modulaires [10].

⁴www.swarmbot.org

3) *Modèles macroscopiques*: Les modèles les plus abstraits considèrent l'essaim de robots dans son ensemble et décrivent les variations en termes de proportions de l'essaim dans un certain état. Ici le gain en terme de temps de calcul est considérable [5], [32], [10]. Néanmoins il devient difficile d'utiliser de tels modèles à des fins prédictives pour la construction du noeud robotique individuel, du fait de leur niveau d'abstraction ne représentant pas toujours explicitement les détails nécessaires aux choix de développement.

B. Types de modèles

1) *Modèles déterministes*: Beaucoup de publications traitant de la robotique en essaim ont pour origine le champ de la dynamique du contrôle. Les bases de ces analyses sont souvent des modèles simplifiés des robots individuels et impliquent des postulats de départ très restrictifs tels qu'un positionnement absolu ou une holonomie parfaite du véhicule, pour permettre un traitement mathématique. Récemment, ces méthodes s'intéressent à des conditions plus réalistes tels que des déplacements non-holonomiques [33] ou la prise en compte du bruit [34].

2) *Modèles probabilistes*: Basés sur la description des états du système avec des chaînes de Markov, les modèles probabilistes ont montré une bonne correspondance quantitative avec les résultats de robots réels [10] ou de simulations réalistes [5], principalement dans des problèmes où la distribution spatiale des robots peut être approximée par une distribution uniforme. Les probabilités de transition d'états peuvent souvent être déterminées par de simples considérations géométriques, ce qui permet ensuite de déduire des équations différentielles (ou à différences finies) ordinaires résumant les transitions d'états moyennes et permettant d'évaluer le nombre de robots dans chaque état. Souvent, du fait des interactions entre robots, les transitions d'états sont fonction du nombre de robots dans des états différents, ce qui résulte en un système différentiel non-linéaire, dont l'étude de la stabilité et de la convergence peut se faire numériquement.

3) *Modèles hybrides*: Les modèles hybrides combinent les composantes continues (par exemple, le mouvement dans l'espace) et discrètes (par exemple, un certain comportement) en un seul formalisme [35] et représentent donc un candidat de choix pour la modélisation des systèmes robotiques en essaim, même si ce champ de recherche est encore en phase initiale.

IV. SYNTHÈSE DE COMPORTEMENTS EN ESSAIM

Si la modélisation des systèmes robotique collectifs permet de décrire formellement un système à des fins d'analyse, la synthèse des comportements en essaim a pour but l'inférence de règles locales à partir de comportements collectifs désirés.

A. Synthèse à base de modèles

A partir d'un modèle probabiliste, Martinoli et al. sont en mesure d'optimiser des paramètres de contrôle pour augmenter l'efficacité du système [10]. Un certain nombre d'études tentent d'utiliser des modèles analytiques pour arriver à synthétiser des contrôleurs, mais les abstractions nécessaires

rendent les résultats difficilement implémentables, voir par exemple [36].

B. Synthèse par apprentissage et évolution

La synthèse automatique par ordinateur procède en premier lieu par la définition de critères de performance pour le système robotique, et ensuite par l'utilisation d'une technique évolutive ou d'apprentissage non-supervisé permettant au système de trouver par lui-même la meilleure manière d'atteindre cette performance. Si l'apprentissage d'un robot individuel a fait l'objet de nombreuses recherches, son utilisation dans le contexte de la robotique en essaim est relativement nouvelle.

L'utilisation de réseaux de neurones artificiels a montré la possibilité de synthétiser des comportements de base tels l'agrégation ou le mouvement collectif [37]; ces résultats impliquant un apprentissage homogène sur tout l'essaim, il a été plus récemment pris en considération des essaims hétérogènes, où chaque robot explore différentes stratégies [38]. Un exemple utilisant la technique d'optimisation par *Particle Swarm Optimization* (PSO) permet de distribuer la recherche dans l'espace des paramètres et d'augmenter par là-même la vitesse d'exécution du processus d'optimisation [39].

V. DÉFIS MÉTHODOLOGIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Malgré les résultats encourageants présentés précédemment, il est clair que le champ de la robotique en essaim ne peut encore être considéré comme mature. Nous proposons ici quelques axes de recherche présentant un intérêt à nos yeux.

A. Systématique dans les résultats

De par le bruit dans les moyens d'interaction avec l'environnement, les systèmes robotiques sont intrinsèquement probabilistes. Ce qui, à la suite de Gat [40], exige une validation des résultats par des études systématiques et une approche statistique. Pourtant, parmi les nombreuses expériences présentées ci-dessus, beaucoup sont plus des preuves de concept que des études systématiques. Plus rares encore sont celles qui présentent des mesures statistiques significatives (voir [29], [22]).

Une des raisons pour ne pas récolter des données de manière systématique est souvent la difficulté expérimentale. En effet, de par la complexité des systèmes en essaim, garder la trace des états du système pour analyse peut contribuer à compliquer l'expérience elle-même. Néanmoins, pour être en mesure de faire correspondre modèles et dispositif expérimental de manière quantitative, il est impératif de récolter toutes les données significatives en un nombre suffisant de répliques. A cette fin, des outils tels que les systèmes de suivi basé sur la vision ont démontré leur intérêt [41].

B. Amélioration de la synthèse

Bien que plusieurs méthodes en mesure de synthétiser des algorithmes de contrôle aient été identifiées, leur succès à été pour l'instant très limité. L'utilisation de modèles très

abstrait pose des problèmes de simplification excessive pouvant compromettre leur utilisation dans un certain nombre de cas. Alors que des modèles plus proches de la réalité, eux, consomment du temps de calcul et ne se prêtent pas à l'analyse formelle. De plus, ils peuvent présenter des risques d'omission de contraintes réelles plus subtiles, qui peuvent affecter la validité de certains résultats. Le besoin se fait donc sentir de trouver une méthode de modélisation unifiée capable de dépasser ces limites.

Si des algorithmes d'apprentissage par évolution ont été utilisés avec succès pour synthétiser des comportements de base tels que l'évitement d'obstacles, il reste extrêmement difficile de faire évoluer des comportements plus complexes, du fait du grand nombre de paramètres à optimiser simultanément. Dans ce contexte, les techniques présentant les meilleurs résultats sont des méta-heuristiques tels que les algorithmes génétiques ou PSO. Elles ont le défaut de livrer des solutions difficiles à analyser, ce qui limite la possibilité de prouver formellement leur convergence ou leur qualité. Il est donc nécessaire de trouver des méthodes de synthèse en mesure de présenter ces propriétés ou de coupler des méthodes d'analyse efficaces, peut-être basées sur des modèles multi-niveaux, avec ces méta-heuristiques.

C. Mécanismes d'attribution de tâches

Nous avons identifié trois mécanismes d'attribution de tâches : attribution déterministe, attribution basée sur un système d'enchères ou basée sur des seuils de réaction. Parmi celles-ci, la dernière est la plus proche d'une utilisation en robotique en essaim. Malheureusement, c'est aussi la moins étudiée dans un cadre d'ingénierie, alors qu'il existe plusieurs exemples d'études théoriques en recherche opérationnelle, ainsi que des résultats initiaux concernant l'attribution par enchères [42]. Un des seuls exemples comparant enchères et seuils de réaction suggère une meilleure robustesse de l'attribution par seuils au bruit ou à une information partielle [43]. Une meilleure compréhension des implications de chaque mécanisme est donc aujourd'hui nécessaire.

D. Positionnement relatif

Il a été montré que le positionnement relatif est souvent crucial pour mener à bien plusieurs tâches de robotique en essaim, comme le mouvement collectif ou la dispersion. Il a aussi été démontré que les résultats peuvent être extrêmement dépendant de la fréquence de rafraîchissement de ce positionnement. Les technologies actuelles présentent un taux de rafraîchissement de 2 à 4 Hz qui ne saurait permettre une bonne coordination à des vitesses de déplacement élevées. Si plusieurs technologies sont actuellement sur les rangs pour résoudre ce problème, la technologie utilisant le temps de vol radio et un déphasage dans la réception semble à même de présenter dans un futur proche toutes les qualités requises (vitesse, miniaturisation, précision, pas d'occlusion) mais la difficulté de mesurer de manière précise le temps de vol la met pour l'instant hors de portée de petites plate-formes robotiques.

La technologie Ultra Wide Band (UWB) est aussi un candidat similaire, qui souffre des mêmes contraintes.

VI. CONCLUSION

Si la robotique en essaim est un champ de recherche stimulant, il est loin de présenter une maturité permettant d'envisager des applications à court-terme. Les recherches présentées ici s'intéressent plutôt à la compréhension du potentiel de coordination que recèle ce paradigme et aux possibilités de modélisation et de synthèse de systèmes robotiques collectifs à grande échelle.

On peut classifier les différentes approches de la robotique en essaim selon un axe de complexité : à une extrémité des algorithmes complètement coordonnés, avec un contrôle complet et un certain nombre de postulats sur le comportement des robots ; de l'autre, les algorithmes totalement aléatoires avec un contrôle minimal du comportement. Une différenciation semblable se retrouve dans la modélisation où des techniques déterministes et probabilistes sont également utilisées. Pourtant, avec le développement du champ de recherche des systèmes hybrides, on remarque une tendance qui pourrait produire une théorie unifiée de la robotique en essaim, mais pour cela ces modèles devraient, en plus de la dualité continu-discret, aussi incorporer celle probabiliste-déterministe d'une manière formelle.

En définitive, les avancées technologiques rendent toute définition de l'auto-organisation basée sur les systèmes naturels de plus en plus obsolète, et rendent les solutions bio-inspirées moins compétitives pour des robots au volume de plus en plus restreint. Toutefois, la miniaturisation continue permettra des applications à des échelles nettement plus petites, au niveau nanométrique, cellulaire ou moléculaire, où les méthodes d'analyse et de synthèse développées dans le cadre de la robotique en essaim trouveront leur importance, leurs nouveaux défis et leurs "retrouvailles" avec des systèmes naturels auto-organisés.

REMERCIEMENTS

A. Martinoli est financé par une subvention du Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (No. PP002-68647). Les auteurs remercient Nikolaus Correll, Chris Cianci, Thomas Lochmatter et Jim Pugh pour leur contribution à cet article.

REFERENCES

- [1] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. SFI Studies in the Science of Complexity, Oxford University Press, New York, NY, USA, 1999.
- [2] D. Gage, "Many-robot MCM search systems," in *Proc. of the Autonomous Vehicles in Mine Contermeasure Symp.*, A. Bottoms, J. Eagle, and H. Bayless, Eds., 1995, pp. 9.55–9.63.
- [3] A. T. Hayes, A. Martinoli, and R. M. Goodman, "Swarm Robotic Odor Localization : Off-Line Optimization and Validation with Real Robots," *Robotica*, vol. 21, pp. 427–441, 2003.
- [4] R. Beckers, O. Holland, and J.-L. Deneubourg, "From local actions to global tasks : Stigmergy and collective robotics," in *Proc. of the Int. Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, ser. Artificial Life, vol. IV (1994), 1994, pp. 181–189.

- [5] W. Agassounon, A. Martinoli, and K. Easton, "Macroscopic modeling of aggregation experiments using embodied agents in teams of constant and time-varying sizes," *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2–3, pp. 163–191, 2004.
- [6] M. J. B. Krieger, J.-B. Billeter, and L. Keller, "Ant-like task allocation and recruitment in cooperative robots," *Nature*, vol. 406, pp. 992–995, 2000.
- [7] B. Webb, "Can robots make good models of biological behaviour?" *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 24, pp. 1033–1050, 2001.
- [8] G. Caprari, A. Colot, R. Siegwart, J. Halloy, and J.-L. Deneubourg, "Building mixed societies of animals and robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 58–65, 2005.
- [9] A. T. Hayes, A. Martinoli, and R. M. Goodman, "Comparing distributed exploration strategies with simulated and real autonomous robots," in *Proc. of the Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems*, ser. Distributed Autonomous Robotic Systems, vol. 4 (2000), Knoxville, TN, USA, October 2000, pp. 261–270.
- [10] A. Martinoli, K. Easton, and W. Agassounon, "Modeling of swarm robotic systems : A case study in collaborative distributed manipulation," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 23, no. 4, pp. 415–436, 2004.
- [11] M. B. Dias and A. Stentz, "A free market architecture for distributed control of a multi-robot system," in *Proc. of the Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, Venice, Italy, July 2000, pp. 115–122.
- [12] C. Cianci, X. Raemy, J. Pugh, and A. Martinoli, "Communication in a swarm of miniature robots : The e-puck as an educational tool for swarm robotics," in *Proc. of the SAB 2006 Workshop on Swarm Robotics*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4433 (2007), Rome, Italy, September/October 2006, pp. 103–115.
- [13] G. Caprari and R. Siegwart, "Mobile micro-robots ready to use : Alice," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Alberta, Canada, August 2005, pp. 3295–3300.
- [14] J. McLurkin and J. Smith, "Distributed algorithms for dispersion in indoor environments using a swarm of autonomous mobile robots," in *Proc. of the Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems*, ser. Distributed Autonomous Robotic Systems, vol. 6 (2007), Toulouse, France, June 2004, to appear.
- [15] M. Schwager, J. McLurkin, and D. Rus, "Distributed coverage control with sensory feedback for networked robots," in *Proc. of the Robotics : Science and Systems Conference*, Philadelphia, PA, USA, August 2006.
- [16] S. Garnier, C. Jost, R. Jeanson, J. Gautrais, M. Asadpour, G. Caprari, J.-L. Deneubourg, and G. Theraulaz, "Collective decision-making by a group of cockroach-like robots," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Swarm Intelligence*, Pasadena, CA, USA, June 2005, pp. 233–240.
- [17] C. W. Reynolds, "Flocks, herds, and schools : A distributed behavioral model," *Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 25–34, 1987.
- [18] J. Pugh and A. Martinoli, "Small-scale robot formation movement using a simple on-board relative positioning system," in *Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics (2008), Rio de Janeiro, Brazil, July 2006, to appear.
- [19] G. Baldassarre, V. Trianni, M. Bonani, F. Mondada, M. Dorigo, and S. Nolfi, "Self-organised coordinated motion in groups of physically connected robots," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Part B*, 2007, to appear.
- [20] J. Nembrini, N. Reeves, E. Poncet, A. Martinoli, and A. F. T. Winfield, "Mascarillon : Flying swarm intelligence for architectural research," in *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Swarm Intelligence*, Pasadena, CA, USA, June 2005, pp. 225–232.
- [21] R. Zlot and A. Stentz, "Market-based multirobot coordination for complex tasks," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 25, no. 1, pp. 73–102, 2006.
- [22] N. Correll and A. Martinoli, "Comparing coordination schemes for miniature robotic swarms : A case study in boundary coverage of regular structures," in *Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics (2008), Rio de Janeiro, Brazil, July 2006, to appear.
- [23] A. T. Hayes and P. Dormiani-Tabatabaei, "Self-organized flocking with agent failure : Off-line optimization and demonstration with real robots," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2002, pp. 3900–3905.
- [24] C. R. Kube and E. Bonabeau, "Cooperative Transport by Ants and Robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 1–2, pp. 85–101, 2000.
- [25] A. Martinoli, A. J. Ijspeert, and F. Mondada, "Understanding collective aggregation mechanisms : From probabilistic modelling to experiments with real robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 51–63, 1999.
- [26] M. Wilson, C. Melhuish, A. B. Sendova-Franks, and S. Scholes, "Algorithms for building annular structures with minimalist robots inspired by brood sorting in ant colonies," *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2–3, pp. 115–136, 2004.
- [27] A. J. Ijspeert, A. Martinoli, A. Billard, and L. Gambardella, "Collaboration through the exploitation of local interactions in autonomous collective robotics : The stick pulling experiment," *Autonomous Robots*, vol. 11, no. 2, pp. 149–171, 2001.
- [28] M. J. B. Krieger and J.-B. Billeter, "The call of duty : Self-organised task allocation in a population of up to twelve mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, no. 1–2, pp. 65–84, 2000.
- [29] P. Rybski, A. Larson, H. Veeraraghavan, M. LaPoint, and M. Gini, "Performance evaluation of a multi-robot search & retrieval system : Experiences with MinDART," *Int. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, to appear.
- [30] O. Michel, "Webots : Professional mobile robot simulation," *Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39–42, 2004.
- [31] R. Vaughan and B. Gerkey, "Really reusable robot code and the player/stage project," in *Software Engineering for Experimental Robotics*, ser. Springer Tracts on Advanced Robotics, D. Brugali, Ed. Springer Verlag, 2007, vol. 30, pp. 267–289.
- [32] K. Lerman, A. Martinoli, and A. Galystan, "A review of probabilistic macroscopic models for swarm robotic systems," in *Proc. of the SAB 2004 Workshop on Swarm Robotics*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3342 (2005), Santa Monica, CA, USA, 2004, pp. 143–152.
- [33] H. Tanner, A. Jadbabaie, and G. Pappas, "Flocking in teams of nonholonomic agents," in *Cooperative Control*, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences, V. Kumar, N. Leonard, and A. S. Morse, Eds. Springer Verlag, 2005, vol. 309, pp. 229–239.
- [34] V. Gazi and B. Fidan, "Swarm aggregations using artificial potentials and sliding mode control," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 6, pp. 1208–1214, 2005.
- [35] A. Balluchi, L. Benvenuti, S. Engell, T. Geyer, K. H. Johansson, F. Lamnabhi-Lagarrigue, J. Lygeros, M. Morari, G. Papafotiou, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, F. Santucci, and O. Stursberg, "Hybrid control of networked embedded systems," *European Journal of Control*, vol. 11, no. 4–5, pp. 478–508, 2005.
- [36] S. Berman, A. Halasz, V. Kumar, and S. Pratt, "Algorithms for the analysis and synthesis of a bio-inspired swarm robotic system," in *Proc. of the SAB 2006 Workshop on Swarm Robotics*, Rome, Italy, September/October 2006.
- [37] M. Dorigo, V. Trianni, E. Sahin, R. Gro, T. Labella, G. Baldassarre, S. Nolfi, J. Deneubourg, F. Mondada, D. Floreano, and L. Gambardella, "Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot," *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2–3, pp. 223–245, 2004.
- [38] L. Li, A. Martinoli, and Y. Abu-Mostafa, "Learning and measuring specialization in collaborative swarm systems," *Adaptive Behavior*, vol. 12, no. 3–4, pp. 199–212, 2004.
- [39] J. Pugh and A. Martinoli, "Multi-robot learning with particle swarm optimization," in *Proc. of the ACM Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Hakodate, Japan, 2006, pp. 441–448.
- [40] E. Gat, "Towards principled experimental study of autonomous mobile robots," *Autonomous Robots*, vol. 2, no. 3, pp. 179–189, 1995.
- [41] N. Correll, G. Sempo, Y. L. de Meneses, J. Halloy, J.-L. Deneubourg, and A. Martinoli, "SwisTrack : A tracking tool for multi-unit robotic and biological research," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, Oct. 2006, pp. 2185–2191.
- [42] M. Dias, R. Zlot, N. Kalra, and A. Stentz, "Market-based multirobot coordination : a survey and analysis," *Proc. of the IEEE*, vol. 94, no. 7, pp. 1257–1270, 2006.
- [43] N. Kalra and A. Martinoli, "A comparative study of market-based and threshold-based task allocation," in *Proc. of the Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems*, ser. Distributed Autonomous Robotic Systems, vol. 7 (2006), Minneapolis, MN, USA, July 2006, pp. 31–40.