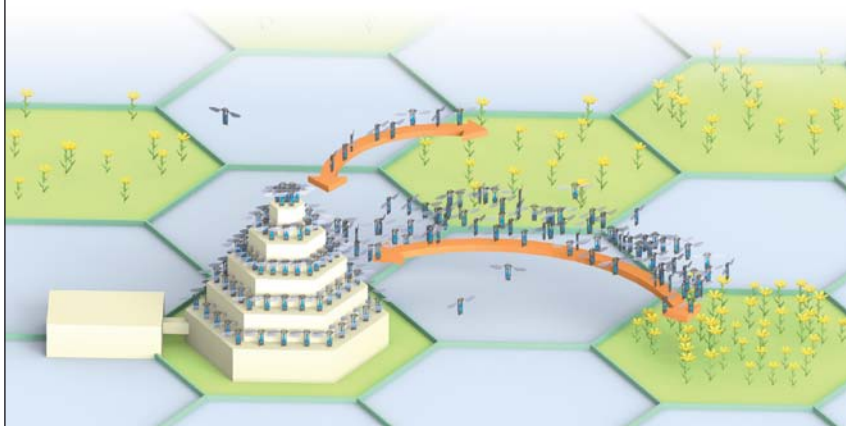


LA COLONIE AU TRAVAIL

Une colonie de milliers de robots-abeilles devra assigner, avec efficacité, des tâches aux différents individus qui la composent, même en l'absence d'une vision globale de l'environnement. Dans le scénario illustré ci-dessous, la ruche a pour tâche de trouver et polliniser des champs de fleurs. Pour commencer, des robots-abeilles explorent différentes régions. À leur retour à la ruche munis d'informations sur les endroits où les fleurs abondent, ces nouvelles informations sont utilisées pour déterminer les zones où se rendront les futures ouvrières. Davantage de robots seront assignés aux zones où il y a plus de travail. Cette stratégie fondée sur la ruche permet aux abeilles de faire montre d'une intelligence collective, même si les contraintes énergétiques limitent la communication entre individus.



des actionneurs de commande plus petits règlent avec précision les mouvements de l'aile pour engendrer un couple destiné aux contrôles et manœuvres de vol.

Le muscle artificiel est constitué de matériaux piézo-électriques qui se contractent quand leur épaisseur est soumise à une tension électrique. Ces actionneurs présentent quelques inconvénients – par exemple, ils nécessitent une tension élevée et sont fragiles –, cependant, ils constituent un cas où la physique de « l'effet d'échelle » est de notre côté. En effet, plus ces actionneurs sont petits, plus ils vont se mouvoir rapidement. Et comme la quantité de travail fournie par cycle (et par unité de masse) reste à peu près constante, un battement plus rapide conduit à une plus grande puissance. De fait, ces muscles développent une puissance comparable à celle des muscles d'insectes de taille similaire.

Au cours de ces dernières années, nous avons expérimenté des dizaines de configurations différentes d'actionneurs et d'articulations. Pour chacune, nous avons notamment cherché à déterminer la facilité avec laquelle nous pouvions la réaliser concrètement, puisque des ruches de robots-abeilles nécessiteront de la production en masse.

Les meilleures ébauches que nous ayons trouvées jusqu'à présent sont fondées sur un sandwich de trois couches : deux plaques dures enserrant un film mince de polymère. Nous créons des articulations en découpant du matériau des couches supérieure et inférieure, ce qui permet à la couche intermédiaire de polymère de fléchir, créant ainsi une articulation de flexion (voir l'encadré pages 66-67).

La source d'énergie, un problème encore non résolu

Nous avons bien progressé dans la construction d'un robot de la taille d'une abeille, mais nous essayons toujours de trouver la meilleure façon de l'actionner. Pour surmonter les fortes contraintes énergétiques du vol à ces petites échelles, une grande partie de la masse du robot doit être consacrée à l'actionneur principal et à la source d'énergie (on peut penser « batterie » ou « piles », bien que nous étudions aussi la possibilité d'utiliser une micropile à combustible à base d'oxyde solide). Ce problème d'énergie a tout d'un cercle vicieux : une importante unité d'alimentation stocke plus

d'énergie, mais nécessite un système de propulsion plus important pour compenser l'augmentation de poids, système qui nécessite à son tour une source d'énergie encore plus volumineuse.

Bien que nous ne puissions pas encore faire voler un robot-abeille grâce à sa propre énergie, nous avons fait la démonstration d'un minirobot de 100 milligrammes capable de produire assez de poussée pour décoller (nous l'avons relié à une source externe d'énergie). Le robot-abeille était également capable de se stabiliser en utilisant une combinaison de mécanismes actifs et passifs. Avec les technologies les plus en pointe en matière de densité d'énergie des piles et au vu de l'efficacité de tous les composants du corps, nous estimons que la durée de vol ne dépasserait pas quelques dizaines de secondes. Pour accroître cette durée, nous cherchons à réduire la masse et à renforcer l'efficacité de chacun des composants du robot.

L'énergie n'est pas le seul facteur qui bride notre robot-abeille. Un cerveau électronique embarqué constitue un autre problème non résolu. Sur le terrain, un robot-abeille devra constamment évaluer son environnement, décider de la meilleure ligne de conduite et commander ses mécanismes de vol. Un dispositif électronique externe fonctionne comme une solution d'appoint dans le laboratoire, mais un robot-abeille en plein travail aura besoin de son propre cerveau.

À un niveau supérieur, le cerveau n'est pas seulement responsable de la commande d'un robot-abeille individuel, mais aussi de la gestion de ses interactions avec les autres robots-abeilles de la colonie. Nous avons entrepris de construire ce cerveau en couches – des capteurs permettant d'interpréter l'environnement physique, un système nerveux électronique qui traite les fonctions de commande de base et un cortex électronique programmable pour prendre des décisions.

Dans une première étape, nous cherchons à mettre au point un sous-système cérébral permettant de voler de façon autonome. Réaliser ce défi suppose une boucle de commande bien ajustée qui englobe des capteurs, des processeurs dont le rôle est de traiter les informations issues des capteurs, mais aussi de commander les actionneurs piézoélectriques. Ce sont ces derniers qui font bouger les différentes parties du corps du robot.

Pour imaginer quels capteurs utiliser et comment structurer le circuit cérébral, nous nous sommes, une fois encore, inspirés de la nature. Les mouches (et d'autres animaux) utilisent deux grands types de capteurs pour se diriger. Les capteurs proprioceptifs donnent à une mouche des informations sur son état interne – la vitesse de battement de ses ailes, par exemple, ou la configuration de ses pattes. Les capteurs extéroceptifs livrent, eux, des informations sur le monde extérieur.

Un système visuel simple, mais efficace

La technologie moderne nous offre des systèmes de géolocalisation, des accéléromètres et des gyroscopes multiaxes, mais ces différents capteurs sont trop lourds ou consomment trop d'énergie pour être utiles. C'est pourquoi nous recherchons un système de vision électronique analogue à celui des vraies abeilles – un système qui analyse le « flux optique », le mouvement apparent des objets dans le champ visuel d'un capteur d'images. Imaginez ce que voit le passager d'une voiture à travers une vitre latérale : les objets proches semblent se déplacer rapidement dans son champ de vision, tandis que les objets éloignés se déplacent lentement. Un système visuel qui utilise cette information peut créer une représentation tridimensionnelle détaillée de son environnement, même s'il n'est équipé que d'un petit capteur d'images simple.

Toutefois, le cerveau de notre robot-abaille doit être suffisamment puissant pour traiter le flux de données provenant de ses capteurs d'images et prendre les décisions appropriées pour diriger les actionneurs du corps. Ici encore, les composants disponibles les plus perfectionnés ne nous sont d'aucune utilité, car trop lourds et gourmands en énergie. En conséquence, nous avons envisagé un nouveau type d'architecture informatique pour le cerveau du robot-abaille, en associant une informatique polyvalente à des circuits spécialisés qualifiés d'accélérateurs.

Contrairement aux microprocesseurs polyvalents (les puces à tout faire qui font tourner les ordinateurs personnels classiques), les circuits accélérateurs sont des blocs de circuits précisément réglés qui ne font qu'une seule chose, mais qui la font bien. Il nous fallait des circuits intégrés accélérateurs pour effectuer les calculs rapides, en

temps réel, de la boucle de rétroaction qui assure la stabilité du vol, tout en limitant strictement la consommation d'énergie.

Un défi majeur a été de trouver quels compromis nous pouvions faire. Par exemple, nous aimerions utiliser une caméra à haute résolution. Cependant, une haute résolution (un grand nombre de pixels) nécessite des capteurs d'images plus grands, donc plus de puissance informatique pour traiter les images. Où se situe l'optimum ?

Pour répondre à ce type de questions, nous avons développé une salle de test spéciale. Nous avons monté un corps de robot-abaille sur un capteur de forces et de couples, et nous lui avons fait battre des ailes. Sur les parois de cette chambre de test, nous projetons des images de l'environnement physique où le robot-abaille devrait voler. Nous pouvons ainsi étudier comment le système visuel, le cerveau et le corps prototypes fonctionnent de conserve pour orienter le minirobot.

Le contrôle du vol n'est qu'un début, bien sûr. Nous étudions aussi d'autres types de capteurs qui permettraient aux robots-abailles d'accomplir des tâches particulières, par exemple localiser une personne emprisonnée dans les décombres à la suite d'un tremblement de terre.

Une capacité que nous ne prévoyons malheureusement pas pour nos robots-abailles actuels est la communication directe d'un minirobot à l'autre – les coûts énergétiques liés à des communications sans fil sont tout simplement trop élevés. Cependant, cela ne signifie pas que les robots-abailles devront agir seuls.

De l'intelligence en essaim

Pris isolément, un robot-abaille sera minuscule et limité par rapport au monde dans lequel nous espérons le faire fonctionner ; de plus, les contraintes en termes d'énergie et de poids restreignent fortement les types de matériel de détection et de communication qu'un tel minirobot peut transporter. C'est pourquoi il nous faut aussi trouver comment construire une colonie. Comme avec les vraies abeilles, un seul robot-abaille ne peut pas accomplir grand-chose. Mais une ruche ? Un comportement de groupe permettrait aux robots-abailles d'explorer de grandes étendues, de sélectionner les zones intéressantes en y effectuant de nombreuses observations simples, de se

LES AUTEURS



Robert WOOD est professeur d'ingénierie et de sciences appliquées à l'Université

Harvard (États-Unis), où il est membre de l'Institut Wyss d'ingénierie bio-inspirée.



Radhika NAGPAL est professeur d'informatique à l'Université Harvard et membre

de l'Institut Wyss.



Gu-Yeon WEI est professeur de génie électrique et d'informatique à l'Université Harvard.

BIBLIOGRAPHIE

M. Rubenstein *et al.*, **Kilobot : A low cost scalable robot system for collective behaviors**, 2012 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3293-3298, 14-18 mai 2012.

R. J. Wood *et al.*, **Progress on « pico » air vehicles**, *International Journal of Robotics Research*, vol. 31(11), pp. 1292-1302, septembre 2012.

D. Cox-Foster et D. van Engelsdorp, **Sauvons les abeilles**, *Pour la Science*, n° 379, mai 2009 (http://bit.ly/pls379_abeilles).



CHRS

2. LE PROTOTYPE DE ROBOT-INSECTE du projet français OVMI [projet ANR *Objet Volant Mimant l'Insecte*, <http://ovmi.iemn.univ-lille1.fr/>, de 2005 à 2008] a une envergure de 3,5 centimètres. Le mode d'actionnement de ses ailes est électromagnétique. Les programmes de l'ANR intitulés EVA [*Entomoptère Volant Autonome*] et IN-ART [*Insecte ARTificiel volant*] poursuivent ces travaux en utilisant des muscles artificiels.

répartir efficacement les tâches et de prospérer même si une partie des individus échouent. Des essaims de petits robots agiles et éventuellement jetables donneraient lieu à de nombreuses applications nouvelles – inspection de lieux dangereux ou difficiles d'accès, pollinisation, localisation de rescapés, etc.

Depuis le début des années 1990, les chercheurs informaticiens travaillant dans le domaine de « l'intelligence en essaim » ont conçu de nombreux algorithmes de coordination puissants inspirés par les insectes sociaux – depuis les stratégies de recherche coordonnée jusqu'au partage intelligent du travail. Mais même avec ces algorithmes, des essaims de robots ne peuvent pas être gérés à la façon d'un robot unique.

La programmation et le raisonnement au niveau des individus deviennent impossibles avec des milliers d'entités. Ce serait comme demander à un développeur de logiciels de s'asseoir à son bureau et de rédiger des instructions gérant chaque bit physique d'un ordinateur. Au lieu de cela, tout comme les compilateurs traduisent les instructions d'un programme informatique écrit dans un langage compréhensible par un humain en une suite de 0 et de 1 qui commandent les transistors d'un microprocesseur, il nous faut un moyen de programmer à un niveau supérieur, c'est-à-dire de programmer la colo-

nie comme un tout – une façon de traduire des instructions globales en programmes comportementaux individuels. Autrement dit, nous avons besoin d'un langage de programmation pour colonies.

Quel est le bon langage capable de saisir ce que font les colonies d'abeilles domestiques et ce que nous souhaitons faire avec les colonies de robots-abeilles ? Il n'existe pas encore de réponse simple, mais, pour débiter, nous avons développé deux langages abstraits. Dans le langage

IL DEVIENT IMPOSSIBLE de programmer, à l'échelle des individus, une ruche de plusieurs milliers de minirobots.

Karma, on peut spécifier un organigramme de tâches que doit accomplir la colonie. Cet organigramme contient des liens représentant des conditions qui déclenchent de nouvelles tâches. Le système *Karma* utilise des informations en provenance des individus pour ajuster l'affectation des ressources aux différentes tâches, d'une façon qui reproduit le rôle de la ruche dans les colonies d'abeilles réelles.

Une approche différente, nommée OptRAD (pour *Optimizing Reaction-Advection-Diffusion*), traite la colonie de robots aériens comme un fluide qui diffuse dans l'environnement. Chaque robot-abeille utilise un algorithme probabiliste pour

déterminer s'il va exécuter une tâche, en se fondant sur l'état actuel de l'environnement. Traiter le système comme un fluide permet à OptRAD de raisonner, à un niveau supérieur, sur les résultats attendus et d'ajuster le comportement du système pour qu'il s'adapte à de nouvelles circonstances.

Nous avons aussi beaucoup à apprendre sur la construction et la mise en service d'une grande colonie de robots, qui ne contient pas des dizaines ou des centaines de robots autonomes, mais des milliers. Avec de tels nombres, faire fonctionner ces robots au niveau des individus devient impossible. Imaginons que chaque robot ait un interrupteur marche-arrêt : s'il fallait cinq secondes pour allumer chacun d'eux, alors mettre en marche 1 000 robots prendrait près d'une heure et demie. Des contraintes similaires s'appliquent à chaque élément, du coût jusqu'à la maintenance – chaque robot doit être bon marché, facile à fabriquer et à faire fonctionner de façon collective. Idéalement, chaque opération doit être mesurable – elle devrait nécessiter une durée constante, qui n'augmente pas avec la taille de la ruche (ou du moins qui n'augmente que très lentement).

Ces défis nous ont incités à créer le système *Kilobot* – un ensemble d'une centaine de robots, chacun de la taille d'une pièce de monnaie, qui se déplacent par vibration et qui communiquent avec d'autres Kilobots voisins. Nous pouvons utiliser cet essaim de minirobots pour tester l'efficacité de nos langages de programmation et de nos modèles mathématiques de comportement émergent. Après tout, si nous n'agissons pas avec du matériel bien réel, nous avons peu de chances de comprendre le comportement émergent des systèmes physiques.

L'essaim de Kilobots peut être utilisé pour tester de nombreux comportements collectifs que nous souhaiterions finalement voir adopter par nos colonies de robots-abeilles. Par exemple, nous pouvons demander à l'essaim de rechercher des cibles dans un environnement donné, puis, une fois que l'un des Kilobots a trouvé une cible, lui demander de rapporter sa localisation à l'ensemble de l'essaim. Nous avons aussi fait en sorte que notre conception du Kilobot soit disponible pour d'autres équipes de chercheurs souhaitant construire leurs propres robots. On peut également se procurer des Kilobots préfabriqués auprès de