

Mobilité contrôlée pour la poursuite de frelons

Laurent Reynaud¹, Isabelle Guérin Lassous² et Jacques-Olivier Calvar¹

¹Orange Labs, 2 av. Pierre Marzin, 22300 Lannion, France

²Université Lyon 1, LIP (ENSL, CNRS, UCBL, INRIA)

Nous nous intéressons au problème de la poursuite de frelons asiatiques, *Vespa velutina*, afin de fournir une aide automatisée pour la détection de leurs nids. Ce problème est soulevé par les apiculteurs désireux de disposer d'une solution efficace de contrôle de cette espèce invasive en Europe. Nous suggérons d'utiliser un réseau de micro-drones (appelés aussi UAV) pour réaliser cette poursuite. Dans cet article, nous proposons une architecture de réseau d'UAVs et un algorithme qui permet de gérer la mobilité de ces UAVs. Nous réalisons une première étude de faisabilité de cette architecture. Nous déterminons, par simulation, les valeurs des principaux paramètres qui permettent d'assurer une bonne connectivité du réseau.

Keywords: mobilité contrôlée, réseaux d'UAVs, connectivité

1 Introduction

La progression géographique très rapide du frelon asiatique inquiète les apiculteurs, la part protéinée du régime alimentaire de cette espèce étant composée à 80% d'abeilles en zone urbaine et de 45 à 50% en zone rurale [IAS]. De plus, les abeilles européennes n'ont pas développé de stratégies de défense efficace contre la prédation du frelon asiatique. Ce dernier n'ayant pas lui-même de prédateur identifié en Europe, et prenant très facilement l'ascendant territorial sur le frelon commun, il n'existe actuellement aucun facteur naturel empêchant la progression de cette espèce invasive. En outre, aucune méthode n'a jusqu'à présent permis d'enrayer la progression du frelon asiatique. Les approches actuellement explorées sont le piégeage, l'utilisation de parasitoïdes et surtout la destruction des nids. Cette méthode est cependant rendue difficile par la variabilité des lieux de nidification et s'appuie sur une recherche manuelle. Celle-ci se fait jusqu'à présent par relevé des directions prises par des individus capturés, puis estimation de la position du nid par intersection de ces directions. Cette technique, bien que montrant une certaine efficacité [Blo08], présente cependant deux inconvénients : d'une part, capturer des individus d'une même colonie en plusieurs endroits complique le problème. D'autre part, même lorsque l'on dispose de ce type de relevé, le procédé s'appuie sur une longue recherche manuelle, les nids se trouvant souvent hors de vue dans la frondaison des arbres.

L'utilisation de micro-drones (aussi appelés UAV pour Unmanned Aerial Vehicle) dotés de possibilités de mobilité autonome permettrait l'accélération des phases de recherche des nids, et suscite l'intérêt des apiculteurs. Cependant, avant d'envisager un tel déploiement d'UAVs, une première étude de faisabilité est nécessaire. Dans cet article, nous décrivons les premières réflexions que nous avons menées suite à la présentation du problème par des apiculteurs. Notamment, nous décrivons, dans la section 2, une architecture de réseau d'UAVs afin de répondre au problème de la poursuite de frelons et nous proposons un algorithme et sa mise en œuvre pratique pour contrôler la mobilité des UAVs dans la section 3. Le choix de cette mise en œuvre est important car il a un impact sur les performances de ces réseaux, notamment en termes de connectivité, comme le montrent les résultats numériques obtenus et présentés dans la section 4.

2 Architecture de réseau d'UAVs proposée

La poursuite de frelons asiatiques s'appuie sur la capture d'individus, qui sont par la suite équipés d'un marqueur visuel[†]. L'objectif est alors de suivre la trajectoire de chacun de ces individus, les uns après les autres, du lieu où ils sont relâchés jusqu'à leur destination, que l'on espère être à proximité de leur nid.

[†]. Les apiculteurs consultés maîtrisent la capture de frelons et la pose d'un marqueur de type balle de polystyrène ou ruban léger.

L'architecture proposée est illustrée dans la figure 1. Elle est constituée des éléments suivants :

- *Un nœud de contrôle* : cet équipement contient toutes les fonctions de suivi de la télémétrie envoyée par les UAVs. Il permet en outre à un pilote de prendre le contrôle manuel, à tout moment, de n'importe quel UAV, même fonctionnant en temps normal de manière autonome. Cette contrainte revêt un caractère structurant pour ce scénario de déploiement.
- *Un UAV de poursuite* : cet UAV est équipé d'un capteur et d'un traitement de vision par ordinateur permettant d'une part de détecter un spécimen marqué à proximité, et d'autre part d'estimer leur position, direction et vitesse. On suppose dans cette étude qu'un seul UAV de poursuite est requis.
- *Des UAVs de relais* : ces UAVs permettent d'établir une route sans fil multi-saut entre un UAV de poursuite et le nœud de contrôle lorsqu'ils ne sont plus à portée radio directe.
- *Des UAVs de réserve* : Peuvent s'activer comme UAV de poursuite ou UAV de relais, selon le besoin.

Tous les UAVs disposent d'un système de mesure inertielle (IMU) et de localisation en extérieur, leur permettant d'estimer régulièrement leur position, leur attitude (roulis, tangage et lacet) ainsi que leur vitesse. Les UAVs ainsi que le nœud de contrôle disposent d'une interface de communication sans fil (ex. IEEE 802.11). En termes de mobilité, l'UAV de poursuite est capable de se déplacer de manière autonome en poursuite du marqueur du frelon relâché. De la même manière, les UAVs de relais sont dotés d'une stratégie de mobilité autonome leur permettant de se déplacer de manière coopérative (vol en essaim). Les stratégies de mobilité sont détaillées dans la section 3. Nous appelons UAV-P l'UAV de poursuite, UAV-R les UAVs de relais et Nc le nœud de contrôle.

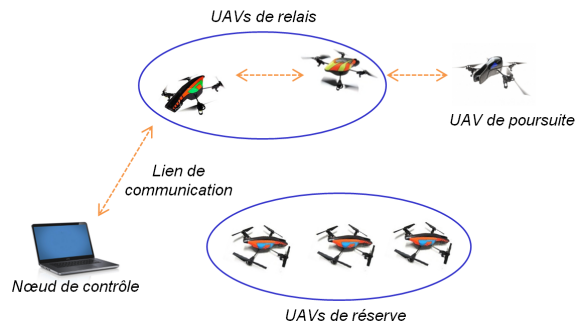


FIGURE 1: Architecture d'un réseau d'UAVs pour la poursuite de frelons.

3 Algorithme et mise en œuvre pratique pour la mobilité contrôlée

Il est possible de définir les motifs de mobilité d'UAV-P par un algorithme d'asservissement dont la valeur de consigne est une position régulièrement calculée à partir de la position du frelon poursuivi. UAV-P étant capable d'estimer régulièrement sa position, son attitude et sa vitesse ainsi que celles du frelon poursuivi, cet algorithme est relativement simple à mettre en place. Pour des raisons de place, nous préférons détailler la mobilité des UAVs de relais. Par conséquent, dans la suite de cet article, nous considérons que les positions d'UAV-P et du frelon poursuivi sont confondues.

Pour les UAVs de relais, nous proposons d'utiliser une mobilité par effet de forces virtuelles. L'avantage de cette approche est qu'elle est distribuée et qu'un nœud prend des décisions locales sur la base d'informations préalablement échangées avec les autres nœuds du réseau, lui permettant d'estimer qu'un nœud de son voisinage exerce sur lui une force virtuelle l'amenant à s'en rapprocher ou s'en éloigner. De nombreuses analogies avec des forces physiques (ex. d'origine newtonienne ou électromagnétique) ont été étudiées [Yan12, SSHH04], généralement dans le contexte d'un très grand nombre de nœuds, devant couvrir de manière uniforme une large surface. Ce type de force virtuelle, où les nœuds se stabilisent souvent à une certaine distance les uns des autres, permet dans ces cas-là d'obtenir un compromis intéressant entre surface couverte (apportée par la propension des nœuds de s'éloigner les uns des autres par effet de répulsion) et connectivité (résultant cette fois-ci des rapprochements par effet d'attraction). Par contraste, nous supposons dans notre scénario de déploiement un nombre limité de nœuds, amenant à concevoir l'algorithme de mobilité contrôlée de manière à utiliser et placer de manière efficace les UAVs de relais disponibles, pour en particulier pouvoir établir rapidement une chaîne de communication stable entre UAV-P et le nœud de contrôle. De plus, la particularité de notre approche est que ces forces virtuelles ne s'appliquent pas indistinctement sur simple critère de proximité entre les nœuds, mais sont exercées spécifiquement par les nœuds ayant besoin de transmettre des données.

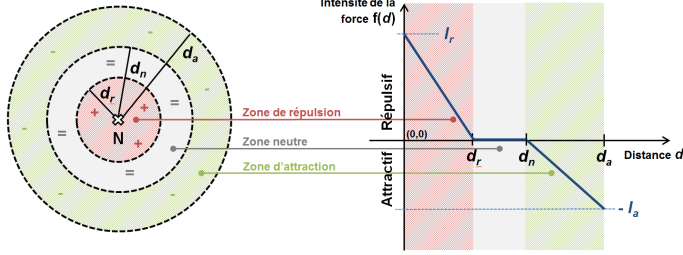


FIGURE 2: Mobilité par effet de forces : zones d'attraction et de répulsion

$$f : [0, d_a] \mapsto [-I_a, I_r], \text{ avec } f(d) = \begin{cases} I_r \cdot \frac{d_r - d}{d_r} & 0 \leq d < d_r \\ 0 & d_r \leq d < d_n \\ I_a \cdot \frac{d_n - d}{d_a - d_n} & d_n \leq d \leq d_a \end{cases} \quad (1)$$

De plus, nous avons conçu notre algorithme de mobilité contrôlée de manière à ce qu'un nœud sous l'influence des forces de N subisse l'effet de frottements dans la zone neutre de N, afin de ralentir et stabiliser ce nœud à proximité. Nous définissons ainsi des forces de frottement $\vec{f}_{fr} = -C_x \cdot \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}$ avec \vec{v} la vitesse du nœud considéré, et C_x un coefficient de frottement. Une fois ces forces déterminées par un nœud qui en outre connaît sa propre vitesse $\vec{v}(t_0)$ à un instant précédent t_0 , celui-ci est capable d'indiquer à son système d'autopilote quelle nouvelle vitesse $\vec{v}(t_1)$ atteindre, avec :

$$\vec{v}(t_1) = \vec{v}(t_0) + (t_1 - t_0) \cdot \frac{\vec{f} + \vec{f}_{fr}}{m}, \text{ et } m \text{ la masse du nœud considéré} \quad (2)$$

En ce qui concerne la mise en œuvre pratique de l'algorithme, l'ensemble des nœuds de la simulation émet à intervalle régulier des messages de signalisation contenant en particulier l'identificateur du nœud, le type de nœud (ex. UAV-R ou UAV-P), les coordonnées et le vecteur vitesse du nœud, un champ indiquant si un nouveau nœud doit être inséré dans la chaîne [‡] (si celle-ci existe), ainsi que l'identificateur des nœuds précédents, suivants et destination dans la chaîne (si applicable). Ces messages sont utiles pour qu'un nœud sous l'influence des forces virtuelles créées par des nœuds voisins, puisse calculer la résultante de ces forces. L'émission de ce type de message est aussi utile pour insérer de nouveaux nœuds dans une chaîne de communication.

4 Evaluation

Dans le scénario considéré, UAV-P envoie lors de ses déplacements des données à Nc, qui reste fixe. Nous évaluons la capacité de l'algorithme de mobilité contrôlée précédemment défini à amener les nœuds UAV-R à se placer efficacement, de manière à ce que le protocole de routage sans fil à sauts multiples utilisé puisse former des chaînes de communications stables pour transmettre des données entre les deux nœuds. L'ensemble des nœuds est initialement situé à l'origine du référentiel, et UAV-P se déplace selon une trajectoire rectiligne uniforme avec une vitesse \vec{v}_P vers une destination D . Au fur-et-à-mesure

TABLE 1: Paramètres de simulation

Simulation	250 simulations indépendantes de durée = 150 s chacune par mesure
Réseau	802.11b, modulation DSSS 1Mb/s pour les broadcasts et unicasts, portée = 100 m
Routage	OLSR, configuration par défaut
Zones de force	$d_r=50$ m, $d_a=100$ m, $I_a = I_r=2,5$ N, $C_x=2$
UAV-P	$D = (350 \text{ m}, 0, 0)$, $\vec{v}_P=4$ m/s
UAV-R	nombre=5, $\vec{v}_{Rmax}=6$ m/s, $m=1$ Kg
Trafic vers Nc	source CBR à 10 Kb/s de $t=5$ s à $t=150$ s

[‡]. Bien que non détaillé ici, la mise en œuvre de l'algorithme s'appuie un mécanisme d'élection et d'insertion dans la chaîne d'un nouveau nœud intermédiaire UAV-R sur critère de comparaison de l'éloignement à Nc avec un seuil de distance prédéfini.

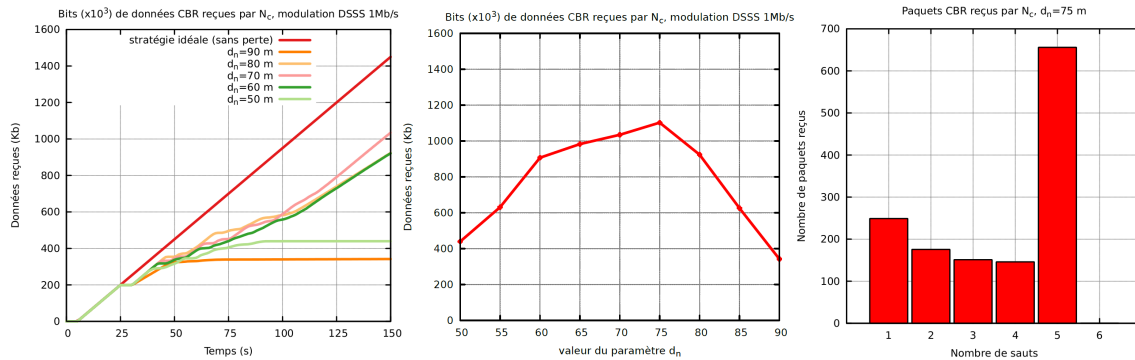


FIGURE 3: Données reçues par le nœud de contrôle en fonction du temps (a), de d_n (b) et pour $d_n=75$ m (c)

qu’UAV-P s’éloigne de N_c , l’échange des messages de signalisation décrits dans la section 3 permet à de nouveaux nœuds de réserve de s’insérer dans la chaîne en tant qu’UAV-R. Ces nœuds suivent alors leur prédécesseur dans la chaîne sous l’effet de forces virtuelles.

Nous évaluons ici, au moyen du simulateur réseau ns-3, l’influence de la valeur du paramètre d_n (définissant comme vu dans la section 3, la taille de la zone neutre autour d’un nœud) sur la performance de la mise en œuvre de l’algorithme de mobilité contrôlée, en fixant par ailleurs les autres paramètres de la simulation, dont nous donnons les éléments clés dans la table 1. Nous étudions pour des valeurs du paramètre $d_n \in \{50, 55, \dots, 90\}$ la performance de la solution sur la base de trois critères :

1- *La position des nœuds en fonction du temps*, permettant de juger de la capacité à obtenir la topologie réseau souhaitée. Les résultats, non illustrés par manque d’espace, montrent que tandis que pour $60 \text{ m} \leq d_n \leq 80 \text{ m}$ nous obtenons la chaîne désirée, les valeurs extrêmes de l’intervalle considéré donnent de mauvais positionnements pour deux raisons : d’une part, $d_n=50 \text{ m}$ implique ici une absence de zone de frottements, ne permettant pas de stabiliser les nœuds intermédiaires UAV-R. D’autre part, $d_n=90 \text{ m}$, au regard de la portée de communication, entraîne une zone insuffisante d’échange des messages de signalisation de notre algorithme pour que les UAV-R soient soumis durablement aux forces virtuelles.

2- *Le nombre de bits de données applicatives reçues par N_c et provenant d’UAV-P*, comme illustré par les figures 3-a et 3-b. Celles-ci confirment les mauvaises performances des valeurs extrêmes de d_n , tandis qu’un maximum est obtenu parmi nos valeurs pré-sélectionnées pour $d_n=75 \text{ m}$.

3- *Le nombre de paquets de données reçus par N_c , répartis par le nombre de sauts nécessaires pour les acheminer*, donnant une information sur le nombre d’UAV-R qui seront mobilisés. La figure 3-c donne l’exemple de $d_n=75 \text{ m}$ où 5 sauts maximums sont requis, donnant un avantage à cette valeur de paramètre sur les valeurs $d_n=70 \text{ m}$ et inférieures, nécessitant elles jusqu’à 6 sauts pour acheminer leur trafic applicatif.

En conclusion, cette étude a permis, à travers la manipulation du paramètre d_n de l’algorithme de contrôle de mobilité proposé, de vérifier l’existence d’un maximum pour les critères de performance définis. Avec ce maximum, les nœuds peuvent exercer des forces virtuelles autour d’eux sur une zone suffisante pour obtenir la topologie attendue, disposer de routes de communications stables pour transmettre efficacement le trafic applicatif, et minimiser le nombre de nœuds (ici d’UAV-R) nécessaires au bon fonctionnement du scénario de déploiement. Dans le futur, nous comptons d’une part approfondir cette étude dans le contexte de scénarios complémentaires, et d’autre part vérifier ces résultats de manière expérimentale.

Références

- [Blo08] J. Blot. Localisation et destruction des nids de frelons asiatiques, conception du réseau de signalement. *Bulletin technique apicole*, 34(4) :205–210, 2008.
- [IAS] IASEF. Fiche descriptive de vespa velutina. <http://www.iasef.fr>.
- [SSHH04] W. M. Spears, D. F. Spears, J. C. Hamann, and R. Heil. Distributed, physics-based control of swarms of vehicles. *Autonomous Robots*, 17(2/3) :137–162, Sep 2004.
- [Yan12] E. Yanmaz. Connectivity versus area coverage in unmanned aerial vehicle networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 719–723, 2012.