

Recherche décentralisée de connexité pour réseaux de capteurs mobiles

Merwan Achibet

1 Introduction

On imagine le problème suivant : un groupe de n capteurs mobiles est réparti aléatoirement dans un espace aérien. On part de l'hypothèse qu'un capteur connaît uniquement le nombre total de capteurs de ce système et qu'il est assez sophistiqué pour pouvoir déterminer précisément sa position absolue. Les capteurs sont dotés de matériel de communication sans fil et peuvent s'envoyer des messages à condition que la distance les séparant soit inférieure à leur rayon d'émission R_c .

Le réseau constitué par cet essaim d'appareils volants forme un graphe dynamique dont les nœuds sont les capteurs. Deux nœuds sont reliés par un arc si les capteurs qui leur sont associés sont en mesure de communiquer, id est s'ils sont assez proches. La figure 1 décrit un exemple de scénario impliquant trois capteurs.

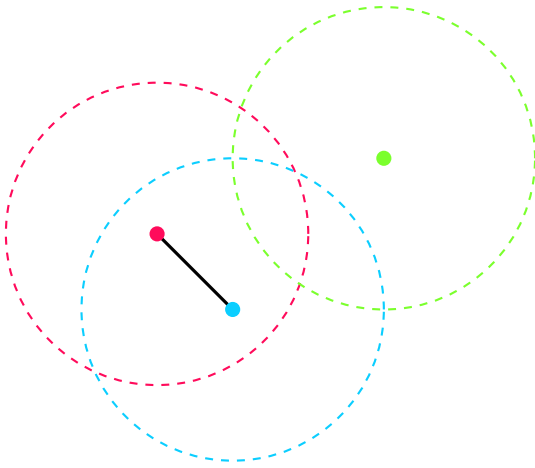


FIGURE 1 – Les capteurs rose et bleu peuvent communiquer et sont connectés tandis que le capteur vert est isolé.

On considère un capteur comme un agent autonome capable de se mouvoir dans l'espace. Afin de ne pas se préoccuper de considérations géométriques superflues, il est supposé qu'un capteur conserve toujours la même altitude et donc on limite son déplacement à deux dimensions. La contrainte principale de cet exercice est que l'on refuse toute forme de contrôle global sur l'essaim de capteurs. Toutes les actions entreprises par un appareil seront uniquement dû à ses décisions propres ; décisions dépendants de la vue réduite du système dont il dispose.

La possibilité pour un capteur de communiquer avec ses semblables est au centre de nos préoccupations car on considère qu'un capteur isolé est inutile puisqu'incapable de partager des données. Dans le contexte de l'étude décentralisée d'un graphe dynamique, deux questions se posent :

1. Comment déterminer si le réseau de capteurs est connexe ?
2. Comment déplacer les capteurs de façon à ce qu'il le devienne ?

Pour répondre à la première question, on se concentrera sur les communications de capteur à capteur en proposant une méthode pour laquelle chaque agent diffuse sa vision de la connexité du réseau, étiquetée en fonction de l'origine de l'information et de sa date. Un mécanisme de filtrage autoréglant sera mis en place pour répandre rapidement les informations critiques telles que l'ajout d'un nouveau nœud à une composante connexe ou la disparition d'un autre.

La réponse à la seconde question s'attachera à l'aspect mobile d'un capteur. On proposera un guidage décentralisé se basant sur l'imitation de plusieurs lois physiques de la nature afin de former un maillage à la fois connexe, équilibré et étalé dans l'espace. Finalement, on envisagera une extension

de ce système pour permettre aux capteurs d'éviter naturellement les obstacles.

2 Déterminer si le réseau est connexe

Le réseau de capteur est hautement dynamique. Sa connexité dépend du mouvement des capteurs et de leur état de fonctionnement

Une étiquette correspond à une information de connexité, relayée de capteur en capteur. Son information principale est le nœud du réseau qu'elle concerne mais elle comprend aussi la date à laquelle l'information est entrée dans le système et le nœud à son origine.

Si l'on traduisait le message d'un capteur à un autre en langue humaine, on pourrait entendre Bonjour, je suis le capteur D, selon moi A et B sont connectés et j'ai des doutes sur F

Un message contient deux listes

- La liste des nœuds dont on est certain qu'ils appartiennent au réseau
- La liste des nœuds en situation douteuse

3 Rendre le réseau connexe

La résolution de ce problème passe par la satisfaction de deux besoins a priori antagonistes. D'une part, il est naturellement nécessaire de réunir les capteurs dans un espace réduit, de façon à ce qu'ils puissent communiquer et échanger des données en continu. D'autre part, et dans l'intérêt de leurs utilisateurs, ils doivent s'étaler dans l'espace afin d'effectuer des mesures sur la plus grande superficie possible. Nous sommes donc dans une situation de compromis, dans laquelle une contrainte technique (la portée de communication) force à agglomérer les capteurs en une même zone, tandis que leur but premier est de ramasser des données en masse et donc, rationnellement, de s'éloigner les uns des autres pour couvrir le plus de terrain possible. La seule issue favorable à ce problème est donc d'aboutir à une situation d'équilibre satisfaisant ces deux contraintes diamétralement opposées.

Le cadre de cet exercice s'accorde parfaitement avec la problématique de la prise de décision dans un réseau décentralisé puisque chaque capteur peut être assimilé à un agent autonome, capable d'agir

sur la configuration de son environnement en se déplaçant dans l'espace. Quel que soit l'état d'un capteur, la vision du système dont il dispose est locale et doit servir seule à déterminer quelles actions il entreprend. L'objectif est donc ici de proposer une méthode de guidage que chaque capteur peut adopter et qui, par émergence d'une dynamique globale, résoudra notre problème en répartissant les capteurs dans l'espace de façon satisfaisante.

Les boîds de Craig Reynolds [Rey87] sont reconnus pour simuler un comportement de groupe a priori complexe et synchronisé à partir d'un jeu de règles simples. On s'en inspire, ainsi que d'un modèle de mouvement particulaire [CSJ11] se basant sur la répulsion entre molécules de gaz, pour concevoir les trois règles qui gouverneront notre système. Chacune de ces lois, que l'on présente séparément par la suite, va engendrer une influence sur le déplacement de nos capteurs ; influence dont la composition sera détaillée en dernière partie.

3.1 Attraction

À la lecture de l'énoncé de ce problème, la nécessité de rapprocher les capteurs les uns des autres, afin qu'un réseau de communication ininterrompu se forme, vient naturellement à l'esprit. En effet, la condition *sine qua non* au bon fonctionnement du réseau est la communication. Un capteur isolé est inutile puisque son information n'est pas partagée.

Par sa loi de la gravitation universelle, Isaac Newton décrit la force qui attire toute paire de corps comme étant proportionnelle à leur masse respective et à la distance les séparant. Nous nous permettons de simplifier quelque peu son équation et d'en retirer l'aspect massique pour obtenir une règle qui a tout couple de corps associe une attraction proportionnelle à leur distance. S'ils obéissaient à cette loi, nos capteurs auraient naturellement tendance à se grouper, et donc à se mettre à portée de communication les uns des autres.

À l'échelle de notre système, le cadre est différent de celui de la loi de Newton, et cette influence n'est pas universelle. Nous ne pouvons malheureusement pas réécrire les règles de ce monde et inventer une attirance magique entre toute paire de capteurs. On peut néanmoins la simuler. Si deux capteurs sont à portée et peuvent échanger leur positions respectives alors la détermination de la distance les

séparant est aisée. À partir de là, on peut imiter un phénomène d'attraction.

Concrètement, on associe à tout capteur c un rayon d'attraction R_a (voir figure 2). Si un capteur voisin se trouve à la fois dans le rayon de communication R_c de c et à l'extérieur de R_a , la force d'attraction que ce capteur devra subir est fournie par la formule suivante :

$$\vec{a} = \frac{\vec{p}_c - \vec{p}_v}{|\vec{p}_c - \vec{p}_v|^2}$$

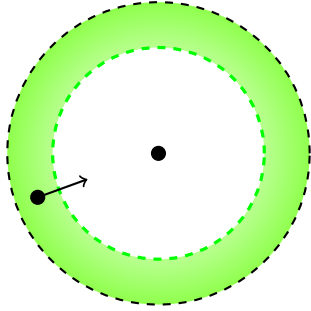


FIGURE 2 – En vert, le rayon d'attraction, dont l'intensité est décroissante de l'extérieur vers l'intérieur.

On note que l'attraction n'a pas pour but d'approcher des capteurs trop éloignés pour communiquer puisque l'existence d'une connexion entre deux capteurs est un prérequis à l'application de la force d'attraction. ???

Dans le phénomène d'attraction réel, l'action est réciproque et instantanée mais dans notre cas elle est unidirectionnelle. Un capteur est attiré par tous ses voisins mais le processus décrit ne modifie pas directement la position du voisin et il n'en subit aucune influence. Il est néanmoins à prévoir que lorsque ce voisin calculera les influences qui s'appliquent à lui, il en subira la réciproque.

3.2 Répulsion

L'attraction a pour effet d'agglomérer en groupes serrés tous les capteurs démarrant la simulation dans une même zone. Mais même si de cette façon la communication est assurée, les capteurs finissent par tous être superposés sur la même position au bout d'un certain nombre d'itérations et la

contrainte de couverture n'est absolument pas satisfaite.

Pour pallier cette déconvenue, on introduit une nouvelle force opposée à l'attraction, la répulsion. Le rayon R_r définit une nouvelle zone radiale qui, contrairement à la loi précédente, expulsera les capteurs envahissants vers l'extérieur. Il est bien sûr nécessaire que $R_r < R_c$.

$$\vec{r} = (\vec{p} - \vec{p}_v) ???$$

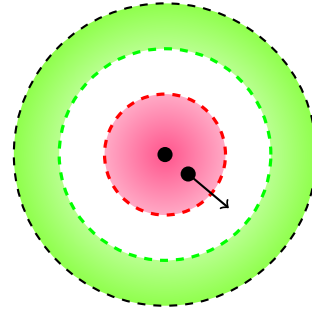


FIGURE 3 – En rouge, le rayon de répulsion, dont l'intensité est décroissante du centre vers les bords.

On prend $R_r = R_a - \varepsilon$, où ε correspond à la largeur d'une bande neutre entourant chaque capteur (voir figure 3). Les capteurs auront naturellement tendance à s'installer dans ces zones libres de toute influence et à se verrouiller ??? . Nous verrons par la pratique que la conséquence principale de ce positionnement forcé est un maillage régulier et géométrique. La régularité spatiale du réseau de capteur est ici un bonus appréciable. ???

3.3 Gravité

Les deux règles présentées permettant aux capteurs proches de s'agglomérer en composantes connexes équilibrées mais notre objectif est d'obtenir une unique composante connexe. Dans cette optique, on introduit une dernière influence inspirée du physique, la gravité.

Comme spécifié en introduction, on part de l'hypothèse que les capteurs sont munis de moyens de localisation dans l'espace et nous en avons allègrement profité pour les calculs de distances des formules précédentes. Toujours dans cette ???, on peut supposer que tous les capteurs connaissent le centre de l'environnement dans lequel ils sont

largués. Cette position peut être la position de laquelle ils ont été largués, une position pré-programmée ou un point calculée de façon commune par moyenne de toutes leur position(sujet intéressant!). L'important est que cette position soit connu de tous et servent d'origine dans leur repère.

La gravité est la force qui va attirer tous les capteurs vers le centre de l'environnement. À première vue, une telle règle semble dangereuse car on imagine qu'elle forcera les capteurs à se déplacer vers le centre de leur environnement au risque de sacrifier la couverture dont nous fait disposer l'effet répulsif inter-particulaire. Néanmoins, on compte sur l'effet combiné des différentes forces pour résister à cet effet.

Son intérêt est d'amener vers le centre les composantes connexes et les capteurs isolés pour tous les assembler en un unique réseau.

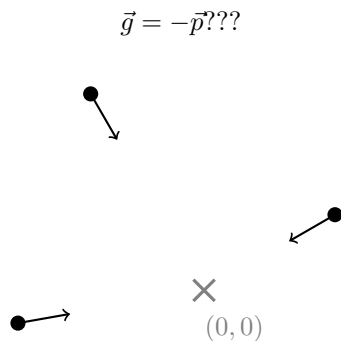


FIGURE 4 – La gravité attire tous les capteurs vers le centre de leur environnement.

3.4 Composition d'une force nette

Une fois ces trois forces calculées, on ne peut pas les appliquer naïvement sur le capteur concerné car il s'agit d'un objet physique soumis à des limitations quant à sa vitesse de déplacement. On associe donc à chaque capteur une vitesse de déplacement maximale qui servira de borne supérieure à la magnitude des trois forces combinées.

Puisque l'on dispose de trois influences différentes, chacune tenant un rôle particulier dans la résolution du problème, l'idée la plus intuitive est d'en déduire une influence moyenne.

$$\vec{f} = \frac{\vec{a} + \vec{r} + \vec{g}}{3}$$

En pratique, on observe que ce choix montre vite ses limites. Dans certains cas, deux forces seront opposées et par ce type de combinaison, elles s'annuleront mutuellement et on obtiendra au final un mouvement nul. Et l'immobilité n'est pas une solution envisageable à ce problème. Dans d'autre cas encore plus fréquents, les trois forces semblent adaptées : on observe des capteurs éparses flotter lentement vers le centre de leur environnement et s'assembler en composante connexe de plus en plus grande au fur et à mesure de leur traversée de l'espace. Mais une fois que le maillage est complet et qu'une situation d'équilibre semble avoir été atteinte, le centre du réseau commence à trembler, les capteurs se rapprochent dangereusement et force le passage vers le centre en ignorant les rayons de répulsions de leur voisin. Ce problème est dû au nombre élevé de tensions s'opérant au centre du réseau, résultant en une pression intense qui fait s'effondrer le réseau jusqu'à ce que tous les capteurs occupent la même position. Moyenner les forces est donc une fausse bonne idée.

MEILLEURE SOLUTION

DEMO EN TROIS IMAGES

3.5 Obstacles

On propose d'étendre ce modèle de guidage afin de permettre aux capteurs d'éviter automatiquement les obstacles par l'ajout d'une nouvelle force virtuelle. Ici, un obstacle est défini comme étant une zone non traversable. En réalité, il peut s'agir d'un bâtiment, d'une zone dont les relevés ne nous intéressent pas, ou d'une zone interdite aux appareils volants.

REPULSION

4 Conclusion

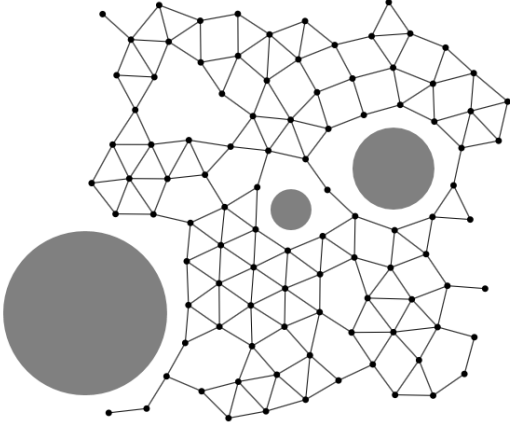


FIGURE 5 –

Références

- [CSJ11] Teddy M. Cheng, Andrey V. Savkin, and Faizan Javed. Decentralized control of a group of mobile robots for deployment in sweep coverage. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(7–8) :497 – 507, 2011.
- [Rey87] Craig W. Reynolds. Flocks, herds, and schools : A distributed behavioral model. In *SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 25–34. ACM, 1987.