

Localisation par intervalles basée sur les ancrés et les non-ancres dans les réseaux de capteurs mobiles

Farah MOURAD¹, Hichem SNOUSSI¹, Fahed ABDALLAH², Cédric RICHARD¹

¹Université de Technologie de Troyes - ICD - LM2S (FRE CNRS 2848)
12 rue Marie-Curie, BP 2060, 10010 Troyes cedex, France

²Université de Technologie de Compiègne - HEUDIASYC (UMR CNRS 6599)
BP 20529, F-60205 Compiègne cedex, France

farah.mourad@utt.fr, hicham.snoussi@utt.fr, fabdalla@hds.utc.fr, cedric.richard@utt.fr

Résumé – Cet article présente une solution originale au problème de localisation des capteurs mobiles. Basée sur la théorie des intervalles, la méthode proposée est une technique à erreur cumulative bornée, implémentée en ligne. L'estimation des positions des capteurs mobiles est effectuée à partir de mesures de connectivités fusionnées à un modèle de mobilité *a priori*. Cette méthode se démarque des précédentes par l'utilisation de mesures réalisées vis-à-vis de tous les capteurs du réseau, y compris ceux démunis de GPS, dits *non-ancres*. L'approche proposée peut être donc implémentée dans le cadre d'un réseau de capteurs à faible densité d'ancres. Comparée aux techniques de localisation existantes, cette étude présente une précision de localisation supérieure avec un coût calculatoire réduit.

Abstract – In this article, we propose an original solution to the localization problem in mobile sensor networks. Based on intervals theory, the presented method is an online technique yielding a bounded-cumulative error. The positions estimation of mobile sensors is performed using connectivity measurements added to an *a priori* mobility model. The novelty of this method remains in the way that it uses the measurements of all the sensors in the network, including those that do not have GPS, denoted *non-anchor nodes*. The proposed approach is thus able to be used in low-anchors density networks. Compared to the existing localization techniques, this method leads to a higher accuracy with a low computational cost.

1 Introduction

Les réseaux de capteurs provoquent un intérêt croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles depuis plusieurs années. Concrètement, un réseau de capteurs sans fil est composé d'un ensemble de capteurs intelligents miniaturisés ayant une capacité énergétique limitée [1]. Le déploiement rapide, le coût réduit et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui les rendent un outil appréciable dans plusieurs domaines d'applications, tels que les activités militaires et le domaine biomédical [2, 3].

La localisation est un problème primordial dans de nombreuses applications des réseaux de capteurs. Les techniques conçues doivent veiller à prolonger la durée de vie du réseau. Une première solution consiste à équiper tous les capteurs de systèmes de positionnement ou GPS (pour *Global Positioning System*) [4]. Cependant, cette méthode s'avère être trop coûteuse sur le plan énergétique en raison de la consommation excessive en énergie des GPS. Une solution alternative plus efficace consiste à n'équiper qu'un faible nombre de capteurs avec des GPS. On les appelle *ancres*. Les autres capteurs, appelés

nœuds ou *non-ancres*, sont localisés en échangeant des informations avec les ancrés. Plusieurs méthodes basées sur les ancrés sont proposées en littérature, telles que les approches bayésiennes de Monte-Carlo [5]. Elles consistent à générer des particules pour couvrir la zone de solution. L'inconvénient primordial de ces méthodes est leur grande consommation de mémoire ayant pour but de sauvegarder toutes les particules.

D'autres techniques basées sur la théorie des intervalles sont proposées, telles que la méthode GBL (pour *Guaranteed Boxed Localization*) présentée dans [6]. Dans ces approches, la localisation est formulée sous forme d'un problème de satisfaction de contraintes définies par un modèle de mobilité et des mesures aux ancrés. La formulation ensembliste du problème permet de prendre en compte l'incertitude sur les données ainsi que les erreurs numériques introduites par le calculateur. Toutefois, la qualité de l'estimation est fortement liée à la densité des ancrés dans le réseau. Dans ce papier, nous proposons une version plus performante de la méthode GBL, dite MGBL (pour *Modified GBL*). Outre les mesures de connectivités aux ancrés, l'algorithme développé utilise les mesures vis-à-vis des nœuds pour résoudre d'une façon garantie le

problème de localisation. Comparée à la méthode GBL, cette technique est plus efficace surtout dans les réseaux à faible densité d’ancres.

Ce papier est organisé comme suit. Dans la section suivante, nous introduisons quelques notions élémentaires de l’analyse par intervalles. Nous détaillons la méthode de localisation proposée dans la section 3. Ensuite, nous illustrons les performances de la méthode par des résultats de simulations dans la section 4. Enfin, nous terminons par une conclusion et quelques perspectives.

2 Théorie des intervalles

L’analyse par intervalles, introduite par Moore [7], est un ensemble d’outils basé sur l’idée de manipuler les intervalles comme une nouvelle classe de nombres réels. Un intervalle de \mathbb{R} , noté $[x]$, est défini comme l’ensemble des nombres réels compris entre les bornes inférieure, \underline{x} , et supérieure, \overline{x} , de l’intervalle comme suit :

$$[x] = [\underline{x}, \overline{x}] = \{x \in \mathbb{R} \mid \underline{x} \leq x \leq \overline{x}\}. \quad (1)$$

Une boîte est un intervalle multidimensionnel défini par le produit cartésien d’intervalles réels : $[\mathbf{x}] = [x_1] \times \dots \times [x_n]$.

Les opérations arithmétiques et ensemblistes, classiquement définies pour les nombres réels, sont étendues aux intervalles [7, 8]. Considérons un opérateur $\star \in \{+, -, *, \div\}$. Alors :

$$[x] \star [y] = [\min\{\underline{x} \star \underline{y}, \underline{x} \star \overline{y}, \overline{x} \star \underline{y}, \overline{x} \star \overline{y}\}, \max\{\underline{x} \star \underline{y}, \underline{x} \star \overline{y}, \overline{x} \star \underline{y}, \overline{x} \star \overline{y}\}]. \quad (2)$$

Grâce à ces outils, on peut envisager d’obtenir des domaines garantis, par une simple transposition aux intervalles des algorithmes numériques classiques opérant avec des nombres réels.

3 Localisation basée sur les ancres et les non-ancres

Le calcul par intervalles permet de résoudre d’une manière efficace une grande classe de problèmes non linéaires, tels que la localisation. Dans un premier temps, nous définissons le problème de localisation. Ensuite, grâce aux techniques par intervalles introduites au paragraphe 2, il sera possible de résoudre le problème tout en garantissant une erreur cumulative bornée.

3.1 Modélisation du problème

L’objectif de la localisation consiste à déterminer les positions géographiques des capteurs en temps réel. Outre les données mesurées, la technique proposée profite de la mobilité des nœuds afin d’améliorer la précision d’estimation. A cet effet, nous proposons un modèle de mobilité assez général qui suppose que la vitesse des capteurs est limitée

à une valeur maximale, notée v_{max} . Le modèle de mobilité est alors donné par l’équation du disque centré sur la position antérieure et ayant v_{max} comme rayon :

$$(x_1(t) - x_1(t-1))^2 + (x_2(t) - x_2(t-1))^2 \leq v_{max}^2, \quad (3)$$

où $x_1(t)$ et $x_2(t)$ sont les coordonnées du capteur à l’instant t et la période de localisation est égale à $1s$.

D’autre part, chaque capteur mobile échange des informations avec les ancres et les nœuds de son voisinage. Les capteurs qu’il détecte se situent à l’intérieur de sa zone de communication. En d’autres termes, les distances du nœud à tous les capteurs détectés sont inférieures à sa portée de communication, notée r . Soient I et J les ensembles d’indices des ancres et des nœuds détectés par le mobile à l’instant t respectivement. Les équations d’observation sont alors formulées comme suit :

$$\begin{cases} (x_1(t) - a_{i,1})^2 + (x_2(t) - a_{i,2})^2 \leq r^2, & i \in I, \\ (x_1(t) - x_{j,1}(t))^2 + (x_2(t) - x_{j,2}(t))^2 \leq r^2, & j \in J, \end{cases} \quad (4)$$

où $a_{i,1}$ et $a_{i,2}$ sont les coordonnées de l’ancre i et $x_{j,1}(t)$ et $x_{j,2}(t)$ sont les coordonnées du nœud j détectés dans le voisinage du capteur estimant sa propre position à l’instant t . Le modèle d’observation se réduit donc à des équations de disques centrés sur les capteurs détectés et ayant r comme rayon.

3.2 Méthode de localisation

L’idée principale de la méthode proposée consiste à substituer l’estimation ponctuelle par un calcul ensembliste basé sur les intervalles. Les positions des nœuds sont alors définies comme des boîtes bidimensionnelles. L’objectif de la méthode revient donc à calculer les boîtes de positions qui satisfont toutes les contraintes. Le problème de localisation est alors traité comme un Problème de Satisfaction de Contraintes (CSP) dans un contexte ensembliste. Pour cela, les équations de mobilité et d’observation sont reformulées comme suit :

$$\begin{cases} [[x_1](t) - [x_1](t-1)]^2 + [[x_2](t) - [x_2](t-1)]^2 = [0, v_{max}^2], & (5) \\ \begin{cases} [[x_1](t) - a_{i,1}]^2 + [[x_2](t) - a_{i,2}]^2 = [0, r^2], & i \in I, \\ [[x_1](t) - [x_{j,1}(t)]]^2 + [[x_2](t) - [x_{j,2}(t)]]^2 = [0, r^2], & j \in J. \end{cases} & (6) \end{cases}$$

Résoudre le problème de localisation revient à trouver les boîtes minimales qui englobent toutes les solutions possibles du problème. Pour atteindre cet objectif, des algorithmes, nommés *contracteurs*, ont été proposés. Partant d’un domaine initial, ils réduisent sa surface afin d’obtenir la boîte minimale englobant le domaine de solution. Le contracteur que nous utilisons est l’algorithme de Waltz [8]. La particularité de ce contracteur est d’itérer toutes les contraintes, une par une, sans ordre *a priori* jusqu’à ce qu’aucune ne contracte plus. La mise en œuvre d’un tel algorithme a l’avantage d’être simple et facilement programmable.

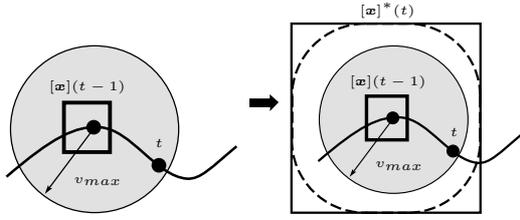


FIG. 1 – Etape de propagation.

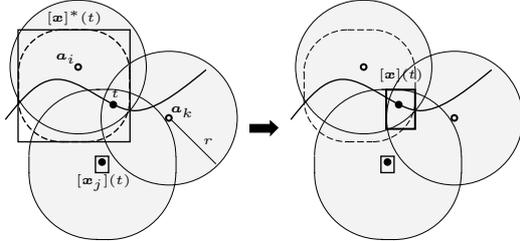


FIG. 2 – Etape de contraction.

La solution consiste alors en deux étapes : la propagation et la contraction. La première revient à propager la boîte de position antérieure, $[\mathbf{x}](t-1)$, en utilisant l'équation de mobilité (5). La boîte résultante forme le domaine de solution initial, notée $[\mathbf{x}]^*(t)$. FIG. 1 illustre la première étape de la méthode. La deuxième étape revient à contracter le domaine initial à l'aide de l'algorithme de Waltz. Chaque nœud itère l'ensemble des contraintes (5) et (6) tout en échangeant des données de positions avec les nœuds et les ancres de son entourage. FIG. 2 montre la boîte minimale obtenue suite à la contraction.

4 Simulations

Pour évaluer les performances de notre méthode, nous avons déployé les capteurs aléatoirement dans une région carrée de $100m \times 100m$. La portée des capteurs est fixée à $10m$ et la vitesse maximale v_{max} est prise égale à sa vraie valeur. FIG. 3 montre trois nœuds mobiles se déplaçant selon un mouvement de groupe autour d'une même trajectoire de référence composée de deux sinusoides [9]. Dans la suite, nous comparons successivement notre méthode à deux différentes techniques basées sur les intervalles et l'approche de Monte-Carlo respectivement.

4.1 Comparaison à la méthode GBL

Dans cette section, nous comparons notre technique à la méthode GBL proposée dans [6]. Basée sur les intervalles, la technique GBL utilise des mesures de connectivités réalisées uniquement vis-à-vis des ancres. FIG. 4.1 illustre la variation du rapport des surfaces des boîtes obtenues par notre méthode sur celles obtenues par la

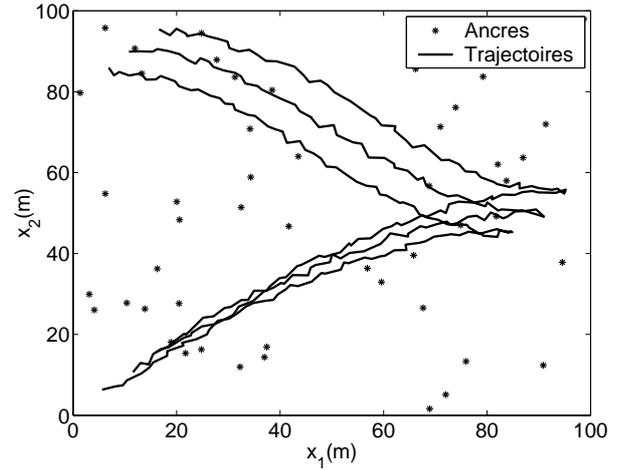


FIG. 3 – Déplacement de trois nœuds selon un mouvement de groupe suivant une référence commune.

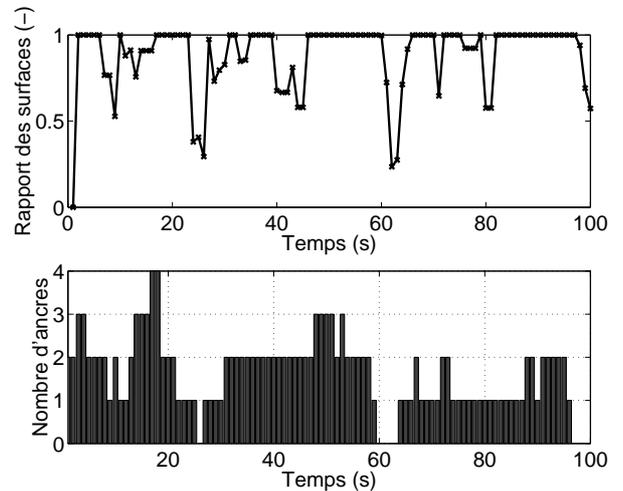


FIG. 4 – Rapport des surfaces des boîtes MGBL/GBL et nombre d'ancres au voisinage d'un nœud mobile.

méthode GBL. Le nombre d'ancres total est égal à 50. Elle montre, en outre, le nombre d'ancres instantané au voisinage d'un des trois nœuds. Le temps calculatoire moyen mis par notre méthode est égal à $0.5003s$ pour un temps égal à $0.5450s$ pour GBL. FIG. 5 montre la variation de l'erreur moyenne ainsi que la surface moyenne des boîtes obtenues avec les deux méthodes en fonction du nombre total d'ancres dans le réseau. Les résultats illustrent clairement les performances de notre méthode par rapport à la méthode GBL surtout dans le cas d'un réseau à faible densité d'ancres.

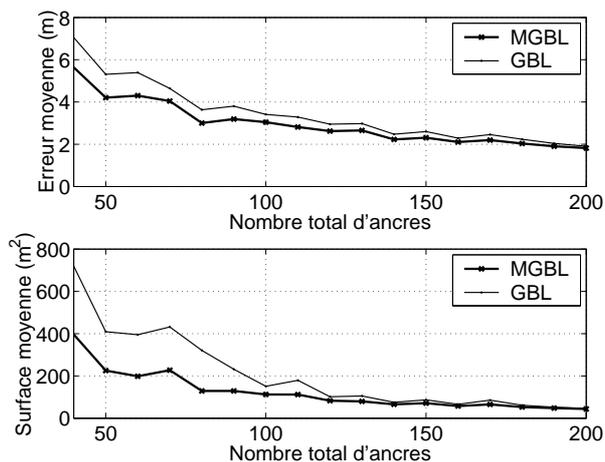


FIG. 5 – Variation de l’erreur d’estimation et de la surface des boîtes en fonction du nombre d’ancres dans le réseau.

4.2 Comparaison à une méthode de Monte-Carlo

La méthode MCL présentée dans [5] est une variante des méthodes de Monte-Carlo. Telle que le filtrage particulaire, cette technique génère un nombre fixe de positions (ou *particules*) afin de couvrir la zone de solution. Dans ce paragraphe, nous comparons notre méthode à la méthode MCL. Nous fixons le nombre de particules à 50 et le nombre d’ancres à 100. FIG. 6 montre les boîtes obtenues suite à la localisation d’un des trois nœuds. Elle illustre en outre les particules obtenues par la méthode MCL. Les temps de calcul moyens sont égaux à 1.198s pour notre méthode et 2.747s pour MCL alors que les erreurs d’estimation moyennes correspondantes sont de 1.8547m et de 2.6267m respectivement. Il faut noter que les boîtes obtenues par notre méthode contiennent toujours les vraies positions alors que les particules générées par MCL ne couvrent pas correctement les zones de solution. Obtenir plus de précision avec MCL revient à utiliser un nombre de particules plus important, ce qui conduit à une augmentation de la consommation de mémoire et d’énergie.

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté une méthode de localisation dans les réseaux de capteurs mobiles. La technique proposée utilise des mesures de connectivités effectuées vis-à-vis des ancres et des capteurs non-ancres situés dans le voisinage du capteur concerné. L’approche proposée peut être donc implémentée dans le cadre d’un réseau de capteurs à faible densité d’ancres. Basée sur les intervalles, cette technique prend en compte l’incertitude sur les données afin de fournir un résultat garanti. Les positions estimées sont alors des boîtes où les positions

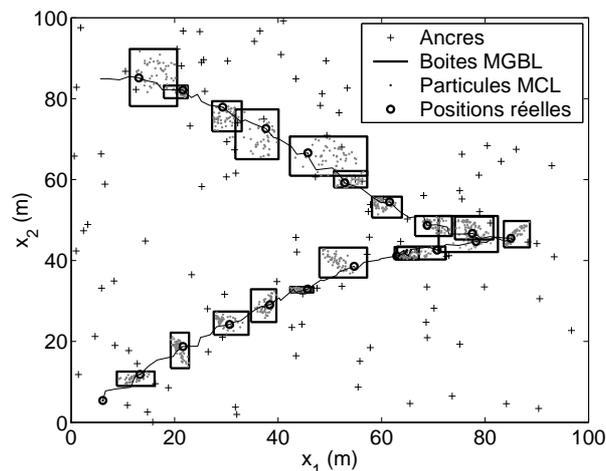


FIG. 6 – Comparaison de notre méthode (MGBL) à la méthode MCL.

ponctuelles réelles existent certainement. Les résultats de simulation montrent que la méthode proposée dépasse les méthodes existantes en termes de précision tout en garantissant un temps calculatoire réduit. Dans des travaux futurs, nous envisageons d’adapter des critères d’observations plus avancés basés sur la comparaison des puissances des signaux échangés. D’autre part, nous souhaitons développer notre méthode dans le cadre d’un environnement imparfait.

Références

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam et E. Cayirci. *Wireless Sensor Networks : A Survey*. Computer Networks, vol. 38, p. 393-422, 2002.
- [2] *Special issue on self-organizing distributed collaborative sensor networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23 (4), 2005.
- [3] *Special issue on Distributed signal processing in sensor networks*. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 16, 2006.
- [4] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger et J. Collins. *Global Positioning System : Theory and Practice*. Springer-Verlag, 1994.
- [5] A. Baggio et K. Langendoen. *Monte-Carlo Localization for Mobile Wireless Sensor Networks*. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, second international conference, MSN, 2006.
- [6] F. Mourad, H. Snoussi, F. Abdallah et C. Richard. *Guaranteed Boxed Localization in MANETs by Interval Analysis and Constraints Propagation Techniques*. GLOBECOM’08, New Orleans, USA, 2008.
- [7] R. E. Moore. *Methods and applications of interval analysis*. Applied mathematics, 1979.
- [8] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit et E. Walter. *Applied interval analysis*. Springer, 2001.
- [9] T. Camp, J. Boleng et V. Davies. *A survey of mobility models for ad hoc network research*. Wireless Communications and Mobile Computing : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications, 2002.