

Techniques de localisation intra-muros à transmission Ultra Large Bande

■ Valérie RENAUDIN, Bertrand MERMINOD et Michel KASSER

Alors que les techniques de radiolocalisation à l'extérieur des bâtiments sont largement exploitées dans les applications commerciales, la localisation intra-muros se place au cœur de beaucoup d'activités de recherche.

Une nouvelle technologie de transmission sans fil à ultra large bande suscite l'engouement. Elle permet des résolutions temporelles théoriques supérieures aux modes de transmission conventionnels. Son fort potentiel face aux exigences de localisation intra-muros est présenté au travers de résultats expérimentaux dans un milieu construit difficilement modélisable.

L'engouement actuel pour la localisation de piétons à l'intérieur des bâtiments résulte de la mise en place de nouvelles réglementations et de l'évolution des besoins des usagers.

Partant du principe que les données de localisation précises de l'émetteur d'un appel d'urgence sont utiles afin d'envoyer les équipes d'assistance aux usagers, que ces derniers ne sont parfois pas en mesure d'expliquer précisément où ils se trouvent, et que les infrastructures de téléphonie mobile permettent la localisation des appels, de nouvelles réglementations ont été instaurées dans plusieurs pays. En 1991, l'agence gouvernementale américaine Federal Communications Commission (FCC) a lancé un service d'urgence, le 911. En Europe, le service d'urgence E112 se met en place depuis juillet 2000, date à laquelle le Parlement Européen a proposé une nouvelle réglementation des télécommunications régissant l'usage des données de localisation. De ce nouveau service découle la nécessité, voire l'obligation pour l'opérateur de localiser avec précision l'origine de l'appel.

Depuis l'avènement du GPS en 1973, l'utilisation des signaux satellitaires pour des applications diverses n'a cessé d'augmenter. De nombreux services géodépendants destinés au grand public, tels que l'information routière, l'accès à des données pratiques sur des points d'intérêt ou encore la localisation des membres d'un groupe, occupent notre quotidien. En parallèle, les besoins du monde professionnel grandissent. Les services d'urgence, des hôpitaux, de police ou d'extinction des incendies ont des demandes exigeantes en termes de guidage et de suivi de personnes. Ils jouent un rôle important dans le développement de ces technologies.

La navigation s'adresse alors à un nouvel environnement : l'intra-muros. Dans ce milieu les techniques de navigation par satellites ne fonctionnent pas car les signaux satellitaires ne pénètrent pas à l'intérieur des bâtiments, leur puissance étant trop affaiblie et les trajets subissant de nombreuses réflexions. D'autres technologies sont donc mises à contribution pour localiser des personnes à l'intérieur.

■ mots-clés

ULB, Navigation pédestre, AOA, TDOA, RSS



Piéton portant l'émetteur ULB Ubisense autour du cou.

Techniques de navigation intra-muros

Il s'agit essentiellement de signaux radio utilisés pour de la télécommunication. On peut citer le système MIT Cricket [1] qui exploite la combinaison d'émission d'ondes radio autour de 418 MHz et d'impulsions d'ultrasons. Des émetteurs sont placés à intervalles réguliers dans un bâtiment. Un récepteur mobile reçoit les signaux et utilise les temps de vol pour calculer sa position. Une autre solution, proposée par Aeroscout [2] exploite les points d'accès WiFi 802.1b (Wireless Fidelity) des réseaux sans fil déjà installés dans les bâtiments. Des boîtiers contenant des étiquettes actives à radiofréquences (Radio Frequency Identification) sont portés par les usagers. En

référence aux points d'accès fixes et au moyen du même standard de communication WiFi, ils transmettent à une centrale les mesures de temps de vol et de puissance des signaux reçus. Ainsi l'utilisateur est localisé dans l'environnement construit.

Les performances de localisation dépendent non seulement de l'influence de l'environnement construit sur la propagation des signaux, mais aussi de la nature des signaux traités. Aussi de nouveaux systèmes basés sur des signaux à Ultra Large Bande (ULB) sont développés.

L'ULB date des années 1960 et consiste en un moyen de communication sans fil destiné, à l'origine, à des applications radar. En 2002, les règles d'émission des dispositifs sans licence dans la bande de fréquences 3.1 - 10.6 GHz ont été révisées aux Etats-Unis. Ce fut le départ de l'exploitation commerciale de l'ULB. L'approbation au niveau européen de sa normalisation est toute récente puisqu'elle date de février 2007. Son entrée en vigueur, attendue d'ici août, dépend maintenant des différentes autorités nationales.

Un des développements de cette technologie a été conduit par la société Ubisense qui propose un système de localisation constitué de points d'accès et d'émetteurs mobiles ULB portés par les usagers. Comparé aux ultrasons, aux ondes WiFi ou encore au Bluetooth, l'ULB offre de meilleures performances de mesure de distance.

La transmission radio ULB repose sur l'émission de trains d'impulsions modu-



Emetteur mobile ULB de la société Ubisense

lées sur un support temporel unitaire de l'ordre de la picoseconde, avec une densité spectrale de très faible puissance sur une large bande. Ces caractéristiques lui procurent une immunité face aux trajets multiples, une bonne résistance face aux interférences et permettent de déterminer avec une grande précision son temps de vol. Ces caractéristiques désignent l'ULB comme un bon candidat pour la navigation intra-muros.

Localiser un nœud à l'aide de l'ULB

Localiser un nœud avec un système sans fil ULB passe par l'enregistrement des signaux radio émis entre un nœud, qualifié de cible, et un certain nombre de nœuds de référence, qualifiés de points d'accès. Suivant la technique de localisation employée, les métriques sont constituées de mesures de puissances de signal, d'angles d'incidence ou de temps de vol.

Puissance de signal (Receiver Signal Strength - RSS)

Appuyé sur des modèles de propagation du signal et sur les mesures d'énergie d'un signal reçu en plusieurs points fixes, les distances entre le mobile et les références sont estimées. La position

du mobile est ensuite calculée, par exemple par triangulation. Cette technique dépend de l'environnement dans lequel le signal est propagé. La précision de localisation est d'autant plus fine que la modélisation de la propagation du signal dans un milieu est détaillée.

Une technique appelée "Finger Printing" permet d'améliorer cette modélisation. Ce principe utilise une base de données des puissances reçues, collectées dans une phase d'apprentissage, et associe la position du mobile à un élément de la base de données. La phase d'apprentissage consiste à quadriller un espace et à associer les puissances reçues à des positions géographiques de l'espace.

La plupart des applications s'appuyant sur du "Finger Printing" utilisent des signaux WiFi [3]. Ceci s'explique certainement par le fait que ce procédé n'exploite pas la principale caractéristique de l'ULB, qui est l'utilisation d'une très large bande, pour améliorer la précision de la position.

Angle d'incidence (Angle of Arrival - AOA)

Un système de localisation basé sur les angles d'incidence mesure l'angle entre la direction de propagation du rayonnement électromagnétique incident et la normale aux dioptries des

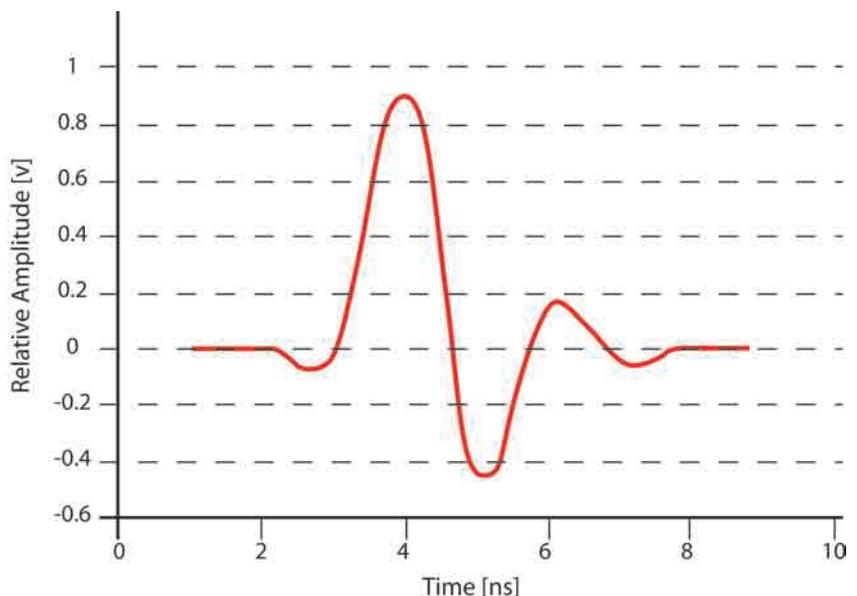


Figure 1 : Exemple de forme d'ULB impulsionnelle.

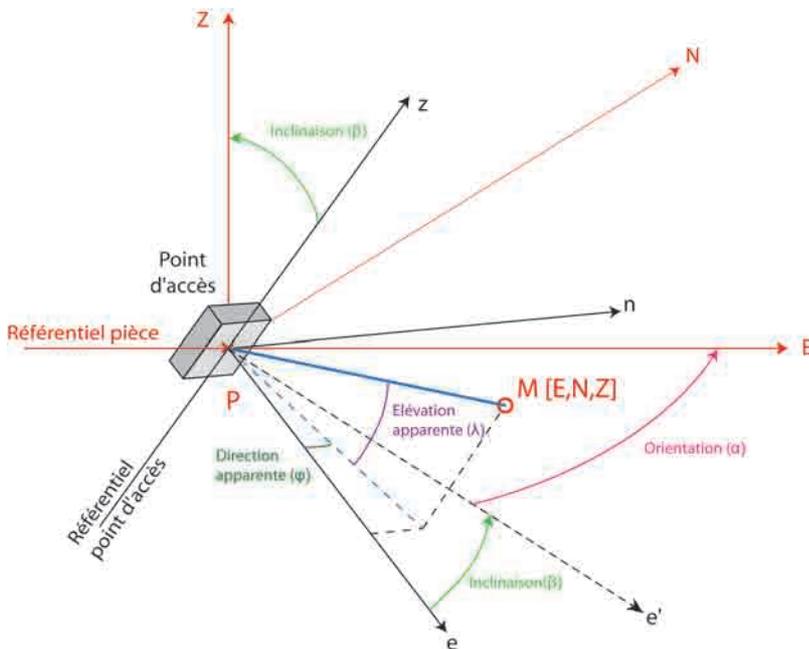


Figure 2: Mesure d'angle d'incidence.

points d'accès, le tout à l'aide de rangées d'antennes spécifiques. Le fait que la propagation des signaux ULB soit plus robuste face aux trajets multiples, grâce à l'emploi d'une très large bande, est plutôt un désavantage dans ce cas. Il est difficile de déterminer avec précision, l'angle d'incidence dans un ensemble de signaux réfléchis.

Ce procédé reste pourtant souvent utilisé dans les systèmes de localisation ULB car il requiert moins de points d'accès pour localiser un mobile. Deux références suffisent pour calculer un point dans un espace plan.

Le système Ubisense mesure les angles d'incidence des signaux ULB émis par l'émetteur mobile. Ainsi les angles de direction apparente (?) et d'élévation apparente (?) du mobile dans le référentiel attaché au point d'accès sont fournis. Afin d'exprimer ces mesures dans le référentiel de la pièce/bâtiment dans lequel on se trouve, il faut tenir compte de l'orientation du point d'accès.

Cette orientation est définie par les angles d'inclinaison (?) et d'orientation (?). Par des contraintes mécaniques, l'angle de rotation autour de la normale au dioptré est ramené à zéro. L'axe (Pn) du référentiel du point d'accès, en noir sur la figure 2, est donc horizontal.

Les angles d'incidence mesurés aux différents points d'accès P_i , décrits par les coordonnées (E_i, N_i, Z_i) dans le référentiel pièce, sont reliés aux coordonnées du point mobile $M (E, N, Z)$ par les équations suivantes. (1)

$$\begin{cases} \tan(\varphi_i - \alpha_i) = \frac{E - E_i}{N - N_i} + v_{\varphi_i} \\ \sin(\lambda_i - \beta_i) = \frac{Z - Z_i}{N - N_i} + v_{\lambda_i} \end{cases} \text{ pour } i = 1, \dots, L$$

L correspond au nombre de points d'accès qui reçoivent le signal impulsionnel. v_{φ_i} et v_{λ_i} sont respectivement les bruits de la direction apparente et de l'élévation apparente.

Le système d'équations (1) peut aussi s'écrire sous forme vectorielle comme suit :

$$\mathbf{B}_{AOA} = \mathbf{H}_{AOA} \mathbf{x} + \mathbf{v}_{AOA} \quad (2)$$

avec

$$\mathbf{B}_{AOA} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \lambda_1 \\ \vdots \\ \varphi_L \\ \lambda_L \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{AOA} = \begin{bmatrix} v_{\varphi_1} \\ v_{\lambda_1} \\ \vdots \\ v_{\varphi_L} \\ v_{\lambda_L} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{AOA} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{N - N_1}{E - E_1}\right) + \alpha_1 \\ \sin^{-1}\left(\frac{Z - Z_1}{N - N_1}\right) + \beta_1 \\ \vdots \\ \tan^{-1}\left(\frac{N - N_L}{E - E_L}\right) + \alpha_L \\ \sin^{-1}\left(\frac{Z - Z_L}{N - N_L}\right) + \beta_L \end{bmatrix}$$

Temps de vol (Time of Arrival - TOA)

Un système de localisation basé, sur le temps mesure, sur les points d'accès l'instant d'arrivée du signal émis par le

mobile. Si les horloges du mobile et du point d'accès ne sont pas synchronisées, il faut ajouter une inconnue de temps à l'équation (4).

Contrairement aux équipements de localisation utilisant la puissance, la précision du système peut être améliorée en augmentant le rapport signal sur bruit ou la largeur effective de la bande. Comme il est possible d'atteindre une très grande précision de localisation, par exemple 2 à 3 cm avec une largeur de bande de 1.5 GHz et un SNR de 0 dB, la qualité de la mesure du temps et la synchronisation de tous les nœuds influent fortement sur les performances.

Il est possible de s'affranchir du problème de synchronisation des horloges entre le mobile et les points d'accès en travaillant avec des différences de temps d'arrivée (TDOA). Dans ce cas, la différence de temps d'arrivée d'un signal émis par un mobile sur deux points d'accès est calculée. Dans l'espace, le lieu géométrique des positions possibles du mobile est décrit par un hyperboloïde dont les foyers sont les deux points d'accès utilisés. Trois mesures de TDOA, résultant de la réception simultanée du signal sur trois points d'accès distincts, sont nécessaires pour calculer la position du mobile. Etant donné la complexité de l'environnement construit, seule une très forte densité de points d'accès, permet d'envisager une telle configuration.

Les points d'accès du système Ubisense, installés de manière fixe sur les murs, sont tous synchronisés via un réseau dédié de câbles blindés Cat5e. L'enregistrement des mesures de TDOA est ensuite fait en continu.

Une mesure de TDOA impliquant le mobile M et les deux points d'accès P_1 et P_2 s'exprime comme suit: (4)

$$c \cdot \Delta t_{12} = \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} - \dots - \sqrt{(E - E_2)^2 + (N - N_2)^2 + (Z - Z_2)^2} + v_{\Delta t_{12}}$$

$v_{\Delta t_{1,2}}$ modélise l'erreur de mesure sur la différence de distances et c la vitesse de la lumière.

En fixant le point d'accès numéro 1 comme référence, l'équation (4)

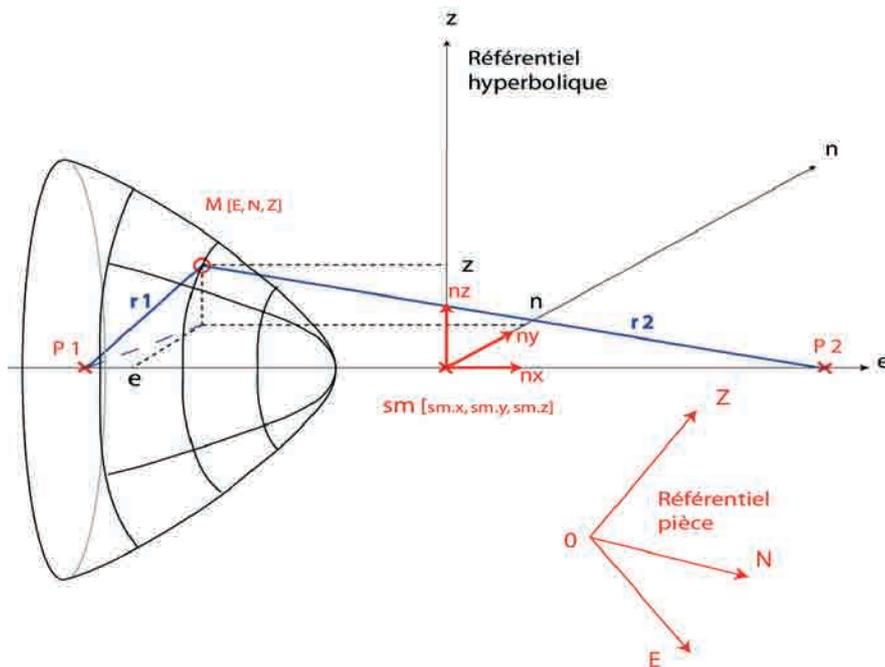


Figure 3 : Mesure de différence de temps d'arrivée.

généralisée à l'ensemble des mesures de TDOA simultanées peut s'écrire sous forme matricielle mettant en relation les mesures et les coordonnées de l'émetteur mobile M.

$$B_{TDOA} = H_{TDOA} \mathbf{x} + v_{TDOA} \quad (5)$$

Avec

$$B_{TDOA} = \mathbf{c} \cdot [\Delta t_{12} \quad \dots \quad \Delta t_{1L}]^T$$

$$v_{TDOA} = [v_{M12} \quad \dots \quad v_{M1L}]^T$$

$$H_{TDOA} = \begin{bmatrix} \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} - \dots \\ \dots - \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} - \dots \\ \dots - \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Algorithme hybride de localisation dans R³

L'intra-muros est un environnement complexe en perpétuelle évolution. L'homme interagit au quotidien avec ce milieu. Il installe du mobilier, ouvre et ferme des portes, modifiant les conditions de propagation. Le corps humain, constitué principalement d'eau salée, absorbe une grande partie des signaux radio. Sa gestuelle réduit parfois l'hémisphère dans lequel les signaux se propagent, comme lorsqu'il s'assoit devant un écran d'ordinateur. Tous ces

éléments montrent à quel point localiser un piéton à l'intérieur, par ondes radio, est une tâche difficile.

Une approche naturelle est de combiner plusieurs méthodes afin d'améliorer les performances de localisation, telles que la précision et la disponibilité. De nombreux algorithmes permettent d'hybrider différentes mesures et de filtrer la position. Elles font souvent l'hypothèse que les bruits qui affectent les mesures sont suffisamment petits et qu'ils sont modélisables comme des variables aléatoires gaussiennes centrées, dont on connaît les covariances.

Des algorithmes utilisant le calcul du maximum de vraisemblance [4, 5], des filtres de Kalman [6], ou bien l'évolution de particules [7] dans des démarches bayésiennes ont été développés. La suite de cet article présente la construction d'un algorithme hybride de mesures TDOA et AOA dans R³ différent de celui utilisé par la solution Ubisense.

Algorithme par moindres carrés

Les équations (2) et (5) contiennent le même vecteur d'état composé des coordonnées du mobile dans le réfé-

rentiel pièce : le Nord (N), l'Est (E) et la hauteur (Z). L'étape suivante est de linéariser les équations qui décrivent les mesures de différences de temps d'arrivée.

Pour transformer le système d'équations en un système linéaire, il suffit d'élever au carré l'équation (4) et d'introduire la variable intermédiaire r qui fait intervenir la distance entre le mobile et un point d'accès choisi comme référent fixe.

$$r = \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} \quad (7)$$

Le nouveau vecteur d'état devient :

$$\mathbf{x} = [E - E_R \quad N - N_R \quad Z - Z_R \quad R]^T \quad (8)$$

En présence d'erreurs de mesure, l'algorithme d'hybridation détermine la position du mobile via l'algorithme standard des moindres carrés. L'estimation de la position du mobile est donc donnée par :

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{B} \quad (9)$$

Résultats expérimentaux

Les hypothèses et les performances de l'algorithme d'hybridation ont été évaluées dans une salle de classe de 225 m², aux murs en métal, équipée avec le système Ubisense. Un piéton portant l'émetteur ULB autour du cou, comme illustré sur la photo, a parcouru la pièce à plusieurs reprises dans sa largeur. Les résultats sont présentés sur la figure 4.

L'écart moyen entre la trajectoire vraie et les positions hybrides est de 1.8 m associé à un écart-type de 10.9 m pour 255 positions calculées. Sur la figure 4, on constate qu'un certain nombre de positions sont complètement erronées, ce qui est cohérent avec l'importance de l'écart-type. Ce constat remet en cause l'hypothèse de modélisation des erreurs de mesures par des variables aléatoires gaussiennes, faite dans la majeure partie des algorithmes de localisation. Afin de vérifier cette explication, un test d'intégrité a été imaginé.

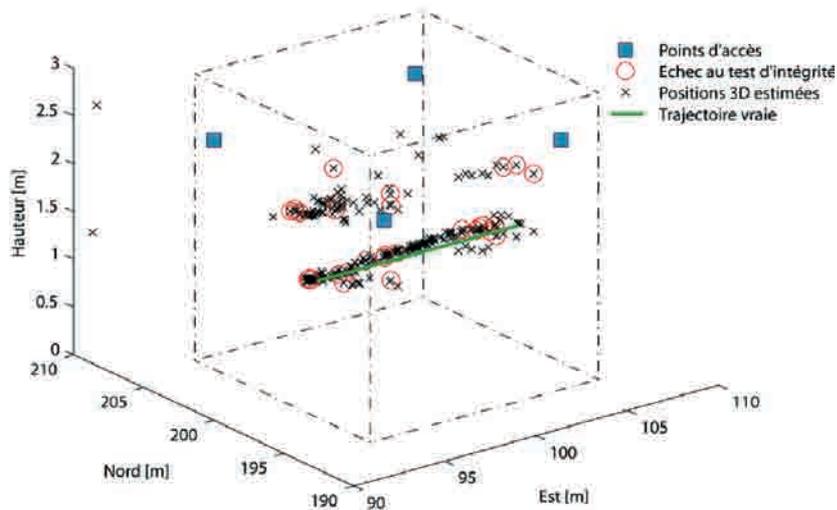


Figure 4 : Résultats de la localisation AOA & TDOA.

Test d'intégrité

L'analyse du vecteur d'état (Equation 8) montre qu'il contient à la fois les coordonnées du vecteur entre le mobile et le point de référence P_R et sa norme. Il est donc possible de comparer la norme calculée à partir des coordonnées au dernier élément du vecteur d'état. Ainsi on peut tester l'intégrité de la solution et détecter tous les points où l'écart est supérieur à 1 mètre. Sur la figure 4, les points ne passant pas le test d'intégrité sont entourés en rouge.

Le test détecte des biais, mais aussi des positions non biaisées. Les erreurs de positionnement à l'intérieur sont dues aux bruits de mesure, mais aussi à la complexité de l'environnement qui agit sur la propagation des signaux en induisant, par exemple, des trajets multiples.

Conclusion

Les premiers résultats de localisation de personnes à partir de mesures ULB et d'un algorithme d'hybridation TDOA & AOA montrent que l'intra-muros requiert une approche différente de celles connues à l'extérieur. Les erreurs de mesures résultent en grande partie de l'interaction de l'environnement construit sur la propagation des signaux radio. Les multiples échos pro-

duits par les phénomènes physiques de transmission, de diffraction et de réflexion sont difficiles à détecter parmi tous les trajets reçus.

Accroître une forme de connaissance a priori de l'environnement construit est une piste pour répondre à cette problématique. Mais cette connaissance est figée et sa mise à jour est fastidieuse.

Modéliser l'intra-muros est une tâche complexe et les attentes des usagers sont hautes. Ce constat ouvre la voie à de nouvelles idées qui nourrissent une recherche prolifique. Les transmissions ULB offrent de belles perspectives de conception de solutions de radiolocalisation intra-muros. ●

Contact

Valérie RENAUDIN
Bertrand MERMINOD
 Ecole Polytechnique
 Fédérale de Lausanne
 ENAC INTER TOPO
 Station 18 - 1015 Lausanne
 SUISSE
<http://topo.epfl.ch>

Michel KASSER
 Ecole Nationale des Sciences
 Géographiques
 Marne-la-Vallée
<http://www.ensg.ign.fr>

Références

1. Priyantha N.B., 2005. *The Cricket Indoor Location System*. Massachusetts Institute of Technology.
2. Villacampa F., 2005. *AeroScout piste en RFID*, *Décision Informatique*, Vol. 631.
3. Evennou F. and Marx F., 2006. *Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning*, *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*.
4. Cheung K.W., So H.C., et al., 2006. *A constrained least squares approach to mobile positioning: algorithms and optimality*, *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, p. 1-23.
5. Gezici S., Tian Z., et al., 2005. *Localization via Ultra Wide band Radios*, *IEEE Signal processing magazine*, p. 70-84.
6. Renaudin V., Yalak O., and Tomé P., 2007. *Hybridization of MEMS and Assisted GPS for Pedestrian Navigation*, *Inside GNSS*, January/February, p. 34-42.
7. Gilliéron P.-Y., Spassov I., and Merminod B., 2005. *Indoor Navigation Enhanced by Map-Matching*, *European Journal of Navigation*, Vol 3.
8. **Site Internet:** www.ubisense.net

ABSTRACT

Keywords: Ultra Wide Band, pedestrian navigation, AOA, TDOA, RSS

Indoor localization is a main current research topic, whereas outdoor radiolocation techniques are widely used in commercial applications.

A new ultra wideband (UWB) radio is regarded as one of the most viable solution for indoor positioning. It has an extremely fine time resolution which enables accurate ranging. Experimental results present its strong potential in indoor environments that are extremely hard to model.