

Mesure conjointe de la distance et de l'orientation d'une surface plane par un transducteur acoustique sous-marin unique

VINCENT CREUZE

LIRMM - Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
 Université Montpellier 2, CC477, 161 rue Ada, 34095 Montpellier Cedex 05, France

Vincent.Creuze@lirmm.fr

Résumé - Nous proposons une nouvelle méthode de mesure de la distance et de l'orientation d'une surface plane (mur, coque de bateau, fond marin) à l'aide d'un seul transducteur acoustique. Cette méthode repose sur l'exploitation du diagramme de rayonnement du transducteur. Cette méthode est une des plus compactes (taille du capteur et de l'électronique associée) et des plus rapides (un seul ping) en acoustique sous-marine pour résoudre ce type de problème. Le dispositif peut donc être embarqué sur de très petits véhicules et fonctionner à des fréquences d'échantillonnage élevées. Par ailleurs, l'encombrement de la bande de fréquence est minimal (1 seul ping monofréquentiel par acquisition) ce qui minimise les interférences avec d'autres dispositifs acoustiques (par exemple un modem). Le type de capteur et la faible quantité de calculs nécessaire en font la méthode la moins coûteuse, avec une consommation d'énergie minimale. Nous avons validé cette méthode en simulant des mesures de distance et d'orientation d'une paroi. Ces simulations nous ont permis de définir la gamme de fonctionnement ainsi que la précision. Nous avons également expérimenté le système en piscine, ce qui nous a déjà permis de valider une partie des résultats de simulation.

Abstract - In this paper, we detail a new method that allows measuring simultaneously distance and orientation of a flat horizontal or vertical surface (e.g. vertical wall, flat bottom) with a single acoustic transducer. A single mono-frequency ping is necessary. Then the analysis of the peaks in the received echo is sufficient to find out both distance and orientation. This method does not require any a priori knowledge of the target backscattering properties. Its advantages are: a very high sampling rate, the smallest and cheapest sensor, and low acoustic interferences with other acoustic devices (single frequency, short ping). We present theoretical aspect, and experimental results.

1 Introduction et état de l'art

1.1 Problème étudié

Le dispositif que nous proposons a pour but de fournir la distance et l'orientation d'une surface plane (Fig. 1). Ces informations sont requises pour accomplir des tâches d'inspection réalisées par des véhicules sous-marins (suivi de paroi verticale, suivi de coque, inspection de barrages hydrauliques).

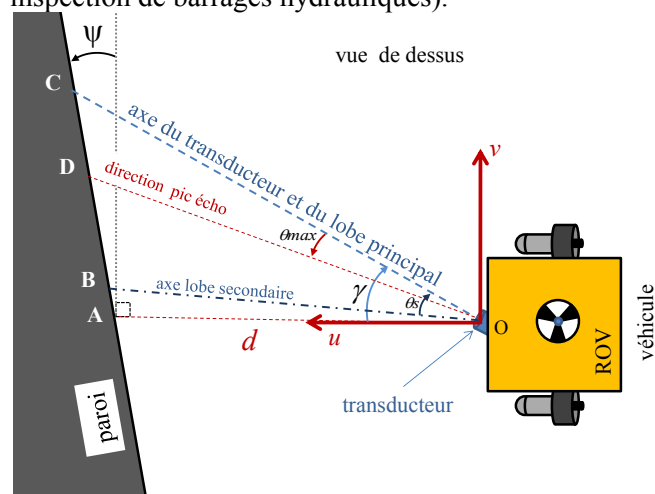


Figure 1 : Véhicule sous-marin (ROV) en train de suivre un mur vertical (vue de dessus). L'axe du transducteur est incliné d'un angle γ par rapport à l'axe u du véhicule.

1.2 Etat de l'art

Il existe plusieurs façons d'obtenir les données nécessaires au suivi d'une paroi par un véhicule sous-marin. La plus courante consiste à utiliser un sonar à balayage [1][2]. Cette méthode présente l'inconvénient d'être lente (balayage), coûteuse et relativement encombrante. Les données traitées sont conséquentes et les algorithmes nécessaires à leur exploitation ont une complexité limitant leur intérêt pour des très petits véhicules autonomes. Certaines autres méthodes reposent sur l'utilisation de plusieurs capteurs élémentaires [3][4], ce qui améliore la rapidité et le coût, mais demeure pénalisant en ce qui concerne l'encombrement et la consommation énergétique. Enfin, plusieurs techniques basées sur un seul capteur ont été proposées en robotique terrestre. Elles reposent sur de l'appariement de modèle (inadapté au cas sous-marin du fait de la variabilité des propriétés de rétrodiffusion des surfaces observées), sur de l'analyse spectrale (coût calculatoire important) [5] ou encore, dans le domaine temporel, sur la mesure des instants où l'écho reçu s'annule (cette méthode présente l'inconvénient d'émettre avec un large spectre) [6].

2 Méthode proposée

2.1 Principe de la mesure

2.1.1 Diagramme de rayonnement

La méthode que nous proposons exploite le diagramme de rayonnement d'un transducteur circulaire. Pour cette géométrie de capteur, le faisceau acoustique présente un lobe principal central entouré par des lobes secondaires d'amplitude décroissante (Fig. 2). L'atténuation de l'onde acoustique $b(\theta)$ en fonction de θ l'angle d'émission s'exprime sous la forme suivante :

$$b(\theta) = \left(\frac{2J_1(2\pi f \frac{r_c}{c} \sin \theta)}{2\pi f \frac{r_c}{c} \sin \theta} \right)^2 \quad (1)$$

où $J_1(\cdot)$ est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1, f est la fréquence de l'onde acoustique émise (200 kHz), r_c est le rayon du transducteur et c est la vitesse du son dans l'eau (1500 m.s^{-1}) [7]. La représentation polaire de $b(\theta)$ en dB (diagramme de rayonnement) fait apparaître un lobe principal entouré de plusieurs lobes secondaires d'amplitude décroissante (Fig. 2). Nous ne considérons que le lobe principal et le premier lobe secondaire (que nous appellerons par la suite « lobe secondaire »). L'amplitude du premier lobe secondaire est très inférieure (-17.7dB) à celle du lobe principal, ce qui rend le lobe secondaire négligeable dans les applications habituelles (sondeur). Nous verrons cependant plus loin que, sous certaines conditions, on peut l'exploiter. Les autres lobes seront négligés, notamment car leur atténuation dépasse 24dB.

2.1.2 Propagation et rétrodiffusion du signal

Une fois que le signal acoustique est émis par le transducteur, il se propage dans l'eau et subit une atténuation par dispersion sphérique (proportionnelle au carré de la distance parcourue), ainsi qu'une atténuation par absorption. Cette dernière, de l'ordre de quelques dB par kilomètre (à 200kHz), sera négligée compte-tenu de la gamme de mesure de notre système (quelques mètres). Lorsque l'onde acoustique émise heurte une paroi, une partie de sa puissance est rétrodiffusée et repart en direction du transducteur.

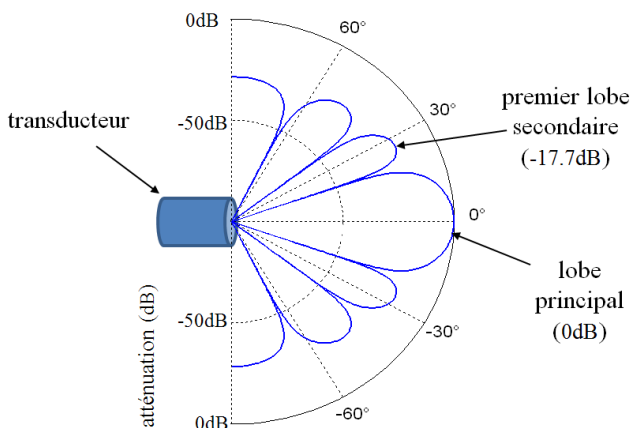


Figure 2 : Diagramme de rayonnement d'un transducteur circulaire (rayon=13.5 mm, f=200 kHz).

L'indice surfacique de rétrodiffusion S_s est exprimé en dB.m^{-2} et représente (en dB) le rapport entre l'intensité acoustique renvoyée et l'intensité incidente par unité de surface. Pour des angles d'incidence φ_i supérieurs à environ 25° , la loi de Lambert fournit une bonne approximation de S_s [8] :

$$S_s = S_0 + 10 \log \cos^2 \varphi_i \quad (2)$$

où S_0 est un paramètre constant dépendant des caractéristiques physiques de la paroi impactée.

Pour les angles d'incidence inférieurs à environ 25° , l'indice de rétrodiffusion est approximé par la formule :

$$S_s = S_N + \frac{\varphi_i}{\varphi_0} (S_0 - S_N + 10 \log \cos^2 \varphi_0) \quad (3)$$

où S_N est le coefficient de rétrodiffusion pour une incidence normale et où φ_0 est une direction de transition dépendant des caractéristiques physiques de la paroi.

2.1.3 Inclinaison du transducteur

En inclinant l'axe du transducteur par rapport à la surface observée, on peut diriger le lobe secondaire de façon à ce qu'il heurte la paroi quasiment perpendiculairement (Fig. 1). Le lobe principal heurtera quant à lui la paroi en incidence oblique. Dans ces conditions, les propriétés de rétrodiffusion (rappelées précédemment) ainsi que les différences de longueurs des trajets sont telles que le lobe secondaire est « fortement » renvoyé dans la direction du capteur, tandis que le lobe principal est beaucoup plus faiblement réémis. Il en résulte un rééquilibrage des intensités des échos des deux lobes et la possibilité ainsi de distinguer ces échos (la différence de longueur de trajet des lobes entraînant aussi une arrivée décalée dans le temps des échos de chacun des deux lobes) (Fig.3).

Une fois mesurés les instants t_s et t_m d'arrivée des deux sommets de l'écho (lobe secondaire d'abord, puis lobe principal) (Fig. 3), le calcul de l'orientation et de la distance de la surface réfléchissante n'est pas aussi direct qu'on pourrait le croire.

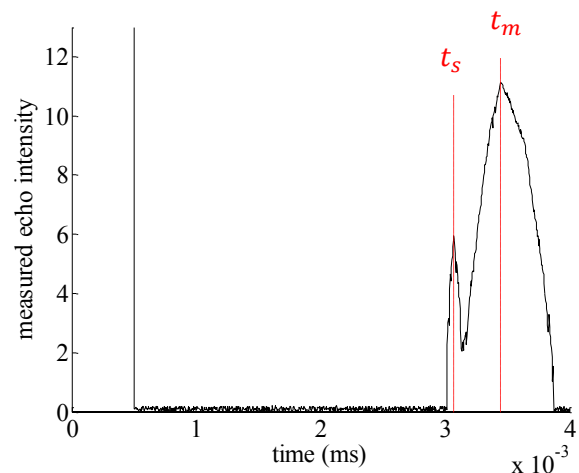


Figure 3 : Acquisition acoustique expérimentale (bassin). Les instants d'arrivée des sommets correspondant aux deux lobes permettent de calculer la distance et l'orientation de la paroi insonifiée.

Si le premier pic correspond bien à l'axe du lobe secondaire (car celui-ci est très étroit), le deuxième pic ne correspond pas à l'axe du lobe principal. En effet, les propriétés de rétrodiffusion de la surface réfléchissante modifient l'amplitude réémise en fonction de l'angle d'incidence et ceci doit être pris en compte. Il faut donc déterminer l'angle θ_{max} correspondant à la direction dans laquelle le pic d'intensité de l'écho du lobe principal sera perçu (Fig. 1).

2.2 Détermination de l'orientation correspondant au pic d'intensité du lobe principal

Nous avons décomposé le faisceau et calculé l'atténuation $H(\theta, d, \psi)$ du signal réémis par la paroi. Cette atténuation est exprimée en fonction de l'angle θ mesuré entre le rayon acoustique considéré et l'axe du transducteur, de la distance d et de l'inclinaison ψ de la surface réfléchissante. Cette atténuation fait apparaître l'atténuation due au diagramme de rayonnement, les pertes par dispersion sphérique et la rétrodiffusion. On remarque que les deux premiers termes sont élevés à la puissance 4 car il s'agit de termes quadratiques qui s'appliquent deux fois (aller et retour). On peut signaler également que la loi de Lambert s'applique pour tout le lobe principal car l'inclinaison du transducteur est supérieure à φ_0 , l'angle de transition de la loi de Lambert, auquel on a ajouté le demi-angle d'ouverture du lobe secondaire. L'expression de l'atténuation $H(\theta, d, \psi)$ est donc la suivante :

$$H(\theta, d, \psi_s) = \left(\frac{2J_1(2\pi f \frac{r_c}{c} \sin \theta)}{2\pi f \frac{r_c}{c} \sin \theta} \right)^4 \frac{1}{\left(\frac{d \cos(\psi)}{\cos(\gamma + \theta - \psi)} \right)^4} i_{f0} \cos^2(\gamma + \theta - \psi), \quad (4)$$

où r_c est le rayon du transducteur, c est la vitesse de propagation du son, f est la fréquence du ping émis, $J_1()$ est la fonction de Bessel d'ordre 1 et i_{f0} est le paramètre de rétrodiffusion de la loi de Lambert, défini par $i_{f0} = 10^{S_0/10}$. Ce dernier paramètre est inconnu et dépend de la nature de la surface insonifiée. De la même façon, d est inconnu, puisque c'est une des grandeurs à mesurer. Cependant, on peut constater que les termes i_{f0} et d n'interviennent pas dans la résolution de l'équation $\frac{dH(\theta, d, \psi)}{d\theta} = 0$. Ainsi, il est possible d'exprimer θ_{max} , l'angle pour lequel on aura la plus forte rétrodiffusion, sous la forme d'une fonction non linéaire $\theta_{max} = g(\psi)$.

La fonction g n'a pas de forme analytique, ce qui sera pénalisant pour la résolution ultérieure de notre problème. On l'interpole donc par un polynôme du second degré, nommé \hat{g} (Fig. 4). Cette phase de la méthode, assimilable à un étalonnage, n'est exécutée qu'une seule fois et ne dépend que du diagramme de rayonnement du capteur. On remarque que la méthode peut être appliquée à n'importe quel type de capteur, tant que l'on dispose d'un relevé expérimental du diagramme de rayonnement et que ce dernier comporte

au moins deux lobes distincts. Il suffit alors de remplacer le terme correspondant au diagramme de rayonnement dans l'équation (4).

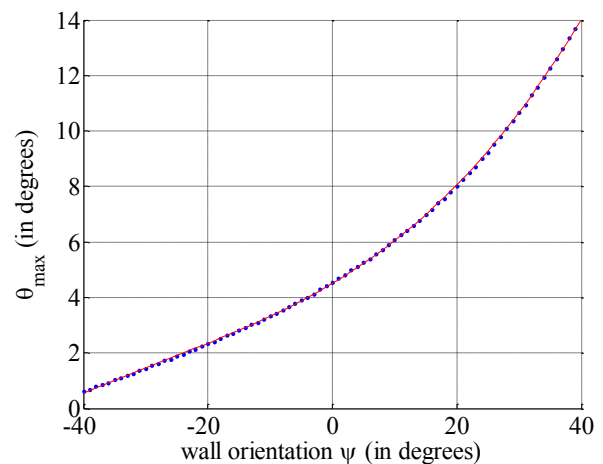


Figure 4 . Avec les paramètres suivants ($f = 200 \text{ kHz}$, $r_c = 1 \text{ cm}$, $c = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\gamma = -47.8^\circ$), la fonction $\theta_{max} = g(\psi)$ (points bleus) est interpolée par le polynôme (trait continu rouge) by $\hat{g}(\psi) = 0.0017\psi^2 + 0.134\psi + 4.506$

2.3 Calcul de la distance et de l'orientation de la paroi

Lors de l'analyse de l'écho reçu, on mesure les instants t_s et t_m d'arrivée des sommets (Fig.3) correspondant respectivement aux échos du lobe secondaire et du lobe principal. Pour cela, on applique un filtre passe-bas au signal reçu afin d'extraire son enveloppe. Ensuite, la dérivation de cette enveloppe permet de déterminer l'emplacement des sommets des deux pics.

Le maximum du lobe principal correspond à l'écho perçu dans la direction θ_{max} . Les angles représentés sur la figure 1 peuvent être exprimés de la façon suivante :

$$\widehat{ABO} = \frac{\pi}{2} - \psi + \gamma - \theta_s \quad (5)$$

$$\widehat{ADO} = \frac{\pi}{2} - \psi + \gamma + \theta_{max} \quad (6)$$

$$\widehat{OAD} = \frac{\pi}{2} + \psi \quad (7)$$

où θ_s est l'angle entre l'axe du lobe principal et l'axe du lobe secondaire. Il est obtenu à partir du diagramme de rayonnement du transducteur. Nous avons alors les relations trigonométriques suivantes :

$$\frac{d}{\sin \widehat{ABO}} = \frac{c \cdot t_s / 2}{\sin \widehat{OAD}} \quad (8)$$

$$\frac{d}{\sin \widehat{ADO}} = \frac{c \cdot t_m / 2}{\sin \widehat{OAD}} \quad (9)$$

où c est la vitesse du son dans l'eau, et $c \cdot t/2$ représente la distance entre le transducteur et un point d'impact sur la paroi.

En combinant les équations (8) et (9) et en remplaçant les angles par les valeurs indiquées dans (5), (6) et (7), on obtient :

$$t_s \cos(\psi - \gamma + \theta_s) - t_m \cos(\gamma - \psi + \theta_{max}) = 0 \quad (10)$$

En remplaçant θ_{max} par $\hat{g}(\psi)$ dans (10), on obtient l'équation ci-dessous, dont la résolution permet de calculer l'orientation ψ de la paroi.

$$t_s \cos(\psi - \gamma + \theta_s) - t_m \cos(\gamma - \psi + \hat{g}(\psi)) = 0 \quad (11)$$

Bien que cette dernière équation n'ait pas de solution analytique, elle peut être aisément résolue numériquement dans la mesure où la fonction \hat{g} est un polynôme connu. Enfin, la connaissance de ψ nous permet d'accéder à la distance d en appliquant au choix l'équation (10) ou l'équation (11), ce qui donne :

$$d = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \gamma - \theta_s\right) \cdot c \cdot t_s}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)} \quad (12)$$

Ainsi donc, on voit qu'à l'aide d'une seule émission/réception (train d'ondes mono-fréquentiel de courte durée), on parvient à mesurer l'orientation et la distance d'une paroi plane à l'aide d'un seul transducteur. Voyons à présent comment cette méthode est mise en œuvre dans un dispositif de mesure automatique.

2.4 Algorithme de traitement du signal reçu

L'extraction de l'orientation et de la distance d'une paroi est obtenue en appliquant l'algorithme suivant :

- **Etape 1 :** Emission d'un bref train d'onde sinusoïdal monofréquentiel (0.1ms).
- **Etape 2 :** Filtrage passe-bas de l'écho reçu afin d'en extraire l'enveloppe.
- **Etape 3 :** Détection des instants d'arrivée t_s et t_m des deux pics en recherchant les points d'annulation de la dérivée de l'enveloppe.
- **Etape 4 :** Résolution numérique de l'équation (11) en calculant la valeur du terme de gauche de l'équation pour $\psi = \psi_{min}$ (valeur théorique minimale de détection du système) et en incrémentant ψ jusqu'à ce que le terme de gauche de l'équation change de signe.
- **Etape 5 :** A partir de l'orientation ψ calculée à l'étape précédente, on calcule d en utilisant (12).

3 Simulations et expérimentations

Une étude en simulation a permis de tester cette méthode dans une plage d'orientation de la surface de -10° à $+10^\circ$, et pour des distances allant jusqu'à 15 mètres. L'erreur sur la mesure de ψ est inférieure à 1° . L'erreur sur la mesure de distance est inférieure à 2%. Nous avons également accompli des expérimentations en piscine (Fig.3) et vérifié ainsi la validité du simulateur. La validation expérimentale de la précision du système est en cours. Les résultats concernant les simulations et la précision peuvent être trouvés dans [9].

4 Conclusion

Par rapport à d'autres dispositifs permettant d'obtenir des informations de distance et d'orientation

d'une paroi, les avantages de celui que nous venons de présenter sont les suivants : rapidité (on n'utilise qu'un seul écho acoustique au lieu de plusieurs), occupation temporelle et fréquentielle de la bande acoustique réduite (une seule émission brève et non modulée en fréquence), encombrement réduit, faible coût.

Les lois de propagations dans l'air et les propriétés de réflexions étant proches, cette méthode pourrait également être utilisée dans l'air et appliquée à la robotique terrestre ou aérienne (suivi de mur, de plafond, de tunnel, de sol...).

Ces travaux ont fait l'objet du dépôt de la demande de brevet européen n°EP11305048.8, le 17/01/2011, ayant pour titre "*Method and device for measuring distance and orientation using a single electro-acoustic transducer*".

5 Références bibliographiques

- [1] Y. Petillot, I. Tena Ruiz, and D. M. Lane, "Underwater Vehicle Obstacle Avoidance Using a Multi-Beam Forward Looking Sonar," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, no. 2, pp. 240-251, April 2001.
- [2] J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte, "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," ser. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Norwell, MA: Kluwer, 1992.
- [3] R. Damus, S. Dasset, J. Morash, V. Polidoro, F. Hover, C. Chryssostomidis, J. Vaganay and S. Willcox, "A new para-digm for ship hull inspection using a holonomic hover-capable AUV," Informatics in control, automation and robotics I, Springer Netherlands, 3, pp. 195-200, 2006.
- [4] T. Yata, A. Ohya, S. Yuta, "A fast and accurate sonar ring sensor for a mobile robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 630-636, 1999.
- [5] T. Yata, S. Yuta, "Measurement of reflecting direction from the center frequency of the echo in ultrasonic sensing," Advanced Robotics: International Journal of Robotics Society of Japan, Vol. 11, n°3, pp. 269-283, 1997.
- [6] T. Yata, L. Kleeman, and S. Yuta, "Wall Following Using Angle Information Measured by a Single Ultrasonic Transducer," in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1590-1596, 1998.
- [7] R.J.Urick, *Principles of Underwater Sound*, Peninsula Pub, 1996.
- [8] X. Lurton, *An introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*, Springer Praxis Books, 2003.
- [9] V. Creuze, "Distance and Orientation Measurement of a Flat Surface by a Single Underwater Acoustic Transducer", in Proc. of EUSIPCO'2011 European Signal Processing Conference, Barcelona, Spain, 2011.