

Reconstitution de l'orientation et des accélérations corporelles à l'aide de capteurs inertiels et magnétiques: Application à l'écophysiologie de l'animal sauvage

Hassen FOURATI^{1,2}, Nouredine MANAMANNI², Lissan AFILAL¹, Yves HANDRICH²

¹CRéSTIC, URCA, EA 3804 – Université de Reims Champagne-Ardenne
UFR SEN, Moulin de la Housse Bat 12, 51687 Reims Cedex 2 France
[\[prenom.nom}@univ-reims.fr](mailto:{prenom.nom}@univ-reims.fr)

²Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIE / Département Ecologie, Physiologie et Ethologie
UMR 7178 CNRS – Université de Strasbourg, 23 rue du lœss, 67037 Strasbourg, France.
hassen.fourati@c-strasbourg.fr, yves-jean-handrich@c-strasbourg.fr

Résumé— L'objectif de ce travail est d'estimer les orientations (attitudes) ainsi que les accélérations corporelles (linéaires) dans l'espace 3D chez l'animal sauvage. L'approche proposée concerne le Bio-logging, une thématique qui s'intéresse à l'étude du comportement de l'animal et de son écophysiologie (localisation et monitoring de ses activités) en utilisant des microsystèmes électroniques. Généralement pour ce type d'application, l'estimation de l'attitude est obtenue en utilisant des capteurs inertiels tels que des accéléromètres et des magnétomètres. Cependant cette technique n'est valable que pour des mouvements basses fréquences de l'animal (quasi-statique). Dans cet article, on propose d'étendre cette estimation au cas dynamique en ajoutant des gyromètres. Ainsi, une méthode de fusion non linéaire de données inertielles provenant d'un accéléromètre, d'un magnétomètre, et d'un gyromètre triaxiaux est proposée. L'estimation de l'orientation servira au calcul des accélérations corporelles de l'animal. Cette information est souvent nécessaire aux biologistes pour évaluer les dépenses énergétiques de l'animal au cours de ses mouvements. Finalement, des essais expérimentaux réalisés sur un cheval illustreront la performance de l'approche proposée.

Mots-clés— Estimation d'attitude, filtre complémentaire, fusion de mesures inertielles, accélération corporelle, Bio-logging.

I. INTRODUCTION

Le problème d'estimation de l'attitude d'un corps rigide a été abordé dans de nombreux travaux de la littérature touchant ainsi des domaines aussi variés que l'aéronautique [1], la robotique [2], la rééducation [3], etc.... Une bonne connaissance de l'attitude est toujours souhaitable dans ces domaines.

Dans ce papier nous nous intéressons à l'estimation de l'attitude dans le cadre du Bio-logging [4], [5]. Cette thématique de recherche s'intéresse à l'étude cinématique et énergétique de la locomotion chez l'animal sauvage à l'aide de microsystèmes attachés au corps. Notons que l'étude cinématique a pour objectif la reconstitution de l'orientation 3D (attitude) de l'animal pour calculer ensuite ses accélérations corporelles (linéaires). Cette information est nécessaire pour pouvoir reconstituer son activité locomotrice et la dépense énergétique correspondante afin de mieux comprendre son comportement. Récemment, divers travaux de recherche commencent à s'intéresser au calcul de l'orientation spatiale chez les animaux. L'idée principale est

de savoir extraire les composantes de la gravité du corps rigide en mouvement (l'animal dans notre cas). Cette information est exploitée par la suite pour déduire l'orientation. Pour ce faire, dans [6], [7], [8] les auteurs utilisent un système embarqué, à base d'accéléromètres et de magnétomètres triaxiaux, attaché au corps de l'animal. Néanmoins, ils ont considéré l'hypothèse que les mouvements sont lents (basses fréquences du mouvement) et ont supposé ainsi que l'accéléromètre ne mesure que la projection de la gravité dans le repère mobile du corps. Cette donnée est combinée ensuite avec les mesures du magnétomètre pour extraire l'attitude sous forme d'angles d'Euler ou de quaternion. Il est évident que pour les hautes fréquences, cette hypothèse dégrade les performances de calcul de l'attitude. La méthode proposée dans [9] utilise un filtre passe-bas pour extraire les composantes de la gravité à partir des mesures de l'accéléromètre durant le mouvement de l'animal. En plus du choix du filtre, cela risque d'introduire des erreurs sur l'estimation de l'attitude dans la mesure où le filtre ne permet pas d'extraire précisément l'information gravité. Dans [10] les auteurs assurent que les données de la gravité peuvent être déduites en faisant une moyenne des accélérations mesurées par le capteur sur une seconde. Cette approximation reste valable dans des cas particuliers insuffisants puisqu'elle dépend de plusieurs paramètres tels que le type d'animal et de mouvement effectué par ce dernier. En effet, si les erreurs commises sur l'estimation de l'attitude sont amplifiées, elles se répercuteront lors du calcul des accélérations corporelles de l'animal qui reste l'objectif majeur de cette étude. Généralement, ces accélérations sont rapides, importantes et imprévisibles.

Afin de remédier à ces problèmes, nous avons proposé dans un premier temps d'utiliser une approche à base d'un observateur non linéaire couplé à un algorithme des moindres carrés itératifs [11], [12]. Cette méthode fusionne des mesures inertielles et magnétiques à partir d'une triade de gyromètre, d'accéléromètre et de magnétomètre. Par la suite l'attitude est estimée en tenant compte du biais dans les mesures de la vitesse angulaire. Notons que d'autres travaux utilisant la même triade de capteurs ont été proposés dans [13], [14] par exemple pour des dynamiques de mouvements plus lentes. Dans un second temps, une autre façon d'aborder la problématique d'estimation de l'attitude en exploitant les mêmes mesures inertielles a été proposée dans [15], [16]. Une

étude théorique et quelques tests préliminaires ont été menés dans ce sens. Cette méthode est basée sur un algorithme de type filtre complémentaire assurant un coût de calcul moins élevé que celui proposé dans [11], [12] où l'estimation de l'attitude est assurée sans recours au calcul du biais dans le gyromètre.

Dans ce papier, on propose d'une part d'élaborer une étude expérimentale étendue de l'approche proposée dans [15], [16] afin d'illustrer sa performance pour l'estimation de l'attitude et des accélérations corporelles de l'animal. D'autre part une étude comparative avec d'autres méthodes traitant la même problématique en Bio-logging a été menée dans le but de démontrer l'avantage d'intégrer des gyromètres dans une telle application. L'idée principale de la méthode est d'utiliser un filtre non linéaire complémentaire couplé à un Algorithme de Levenberg Marquardt (ALM) exploitant des mesures à partir de capteurs MEMS tels qu'un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre triaxiaux. Cette approche a été validée avec des dynamiques de mouvement aussi importantes que celles observées sur le manchot royal. Elle permet aussi de remédier à l'absence de données GPS (dans la limite du possible) qui sont parfois nécessaires dans ce type de problématique (estimation de l'attitude).

Ce papier est organisé comme suit : La section II décrit la représentation de l'attitude utilisée et les systèmes de coordonnées considérés. La structure du filtre non linéaire pour l'estimation de l'attitude est ensuite détaillée dans la section III. La section IV est consacrée à l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à partir du mouvement d'un cheval. Des comparaisons avec d'autres méthodes appliquées déjà en Bio-logging seront présentées afin de montrer les performances de l'approche proposée pour l'estimation de l'attitude ainsi que les accélérations corporelles de l'animal. Finalement, une conclusion est présentée dans la section VI.

II. MOYENS ET OUTILS DE TRAVAIL

A. Attitude d'un corps rigide

L'attitude d'un corps rigide dans l'espace est la manière dont est disposé cet objet, indépendamment de la position de son centre d'inertie. Généralement, l'attitude d'un corps rigide représente la direction de ses axes principaux par rapport à un trièdre de référence et sa dynamique exprime le changement de l'orientation de l'objet due aux forces extérieures agissant sur ce dernier.

B. Systèmes de coordonnées utilisés

Afin d'étudier le mouvement (attitude) d'un corps rigide dans l'espace, deux principaux systèmes de coordonnées peuvent être définis à savoir le système de coordonnées mobile $B(X_B, Y_B, Z_B)$ et le système de coordonnées local fixe $N(X_N, Y_N, Z_N)$ (figure 1). Le repère $B(X_B, Y_B, Z_B)$ est lié à la structure du corps rigide et ses axes sont choisis de sorte qu'ils coïncident avec les principaux axes d'inertie du corps en question. Le repère de navigation $N(X_N, Y_N, Z_N)$ est tangent à l'ellipsoïde terrestre. Les vecteurs unitaires X_N , Y_N , et Z_N coïncident respectivement avec les directions Nord magnétique local, Est, et la pesanteur (N-E-D: Magnetic North, East, Down).

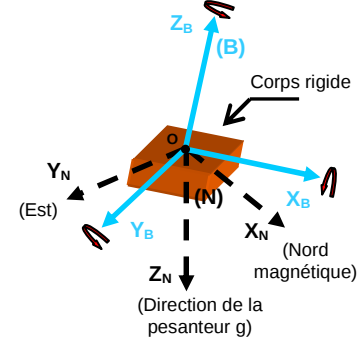


Fig. 1. Les systèmes de coordonnées d'un corps rigide

C. Représentation de l'attitude utilisée : les quaternions

Afin d'être capable d'exprimer l'attitude dans un système de coordonnées, des techniques de passage sont nécessaires. Dans ce travail, nous avons opté pour le quaternion. Un quaternion unitaire est défini par :

$$q = s + v = s + v_x i + v_y j + v_z k \quad (1)$$

où $s \in \mathbb{R}$ et $v = v_x i + v_y j + v_z k \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ représentent respectivement la partie scalaire et imaginaire du quaternion. Le lecteur peut se référer à [17] pour plus de détails sur l'algèbre des quaternions.

III. APPROCHE PROPOSEE POUR L'ESTIMATION DE L'ATTITUDE EN BIO-LOGGING

Cette section présente l'idée principale de l'approche proposée dans ce papier. Elle permet d'estimer de manière précise l'attitude d'un corps rigide. L'idée est d'étendre puis d'améliorer les approches développées dans [6], [7], [8], [9], [10]. Ces dernières sont basées seulement sur des mesures d'accélération et de champ magnétique et sont limitées à des mouvements quasi-statiques de l'animal (les basses fréquences).

Pour remédier à ce problème, on propose d'ajouter une autre information à partir des gyromètres et de développer un filtre non linéaire qui combine ces trois mesures (force spécifique, champ magnétique et vitesse angulaire) de manière complémentaire. Le choix du gyromètre s'explique par sa capacité à produire des mesures de l'attitude à haute fréquence (par intégration) [18].

Soit l'équation cinématique d'un corps rigide donnée par [18]:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega_q \quad (2)$$

où $\omega_q = \begin{bmatrix} 0 & \omega^T \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^4$ est le quaternion pur relatif au vecteur vitesse angulaire $\omega = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3$ exprimée dans le repère B [17]. Le produit $\otimes$ est donné par :

$$q \otimes \omega_q = \begin{bmatrix} s & -v^T \\ v & I_{3 \times 3} s + \begin{bmatrix} v^\times \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

où $I_{3 \times 3}$ est la matrice identité et $\begin{bmatrix} v^\times \end{bmatrix}$ est un tenseur antisymétrique défini par :

$$\begin{bmatrix} v^x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -v_z & v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ -v_y & v_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Finalement, à partir de (2), on peut extraire le système d'équation (3) suivant :

$$(3) : \begin{cases} \dot{s} = -\frac{1}{2}(v_x\omega_x + v_y\omega_y + v_z\omega_z) \\ \dot{v}_x = \frac{1}{2}(s\omega_x - v_z\omega_y + v_y\omega_z) \\ \dot{v}_y = \frac{1}{2}(v_z\omega_x + s\omega_y - v_x\omega_z) \\ \dot{v}_z = \frac{1}{2}(v_x\omega_y - v_y\omega_x + s\omega_z) \end{cases} \quad (5)$$

où $q = [s \ v_x \ v_y \ v_z]^T \in \mathbb{R}^4$ est le vecteur d'état représentant le quaternion de rotation.

Afin de fusionner les trois types de mesures considérées dans le papier, la sortie $y \in \mathbb{R}^6$ du système (3) est choisie comme suit :

$$y = [f_x \ f_y \ f_z \ h_x \ h_y \ h_z]^T \quad (6)$$

avec

f_x , f_y , et f_z représentent les mesures de l'accéléromètre triaxial et h_x , h_y , et h_z dénotent les mesures du magnétomètre triaxial. La relation entre les sorties du système définies dans (6) et le quaternion q caractérisant l'attitude de l'objet peut être définie théoriquement par [15] :

$$y = \begin{bmatrix} M_N^B(q) & 0 \\ 0 & M_N^B(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_N^B(q)a \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_h \end{bmatrix} \quad (7)$$

tel que

$M_N^B(q)$ est la matrice de rotation exprimée en fonction du quaternion q et définie par :

$$M_N^B(q) = \begin{bmatrix} 2(s^2 + v_x^2) - 1 & 2(v_x v_y + s v_z) & 2(v_x v_z - s v_y) \\ 2(v_x v_y - s v_z) & 2(s^2 + v_y^2) - 1 & 2(s v_x + v_y v_z) \\ 2(s v_y + v_x v_z) & 2(v_y v_z - s v_x) & 2(s^2 + v_z^2) - 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Le but de cette approche est de faire un compromis entre la précision à court terme fournie par l'intégration des mesures du gyromètre (5) et la précision à long terme obtenue par les mesures de l'accéléromètre et du magnétomètre (7). En effet, les mesures d'accélération et de champ magnétique serviront par la suite, dans le filtre complémentaire, à compenser les erreurs de calcul de l'attitude q , dues à l'intégration des mesures biaisés du gyromètre dans (5) [13].

Afin de compenser les dérives sur l'estimation du quaternion qui seront observées lors de l'intégration de l'équation (5), un

terme de correction T sera introduit dans cette équation en se basant sur un produit de quaternion :

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{s}} \\ \dot{\hat{v}}_x \\ \dot{\hat{v}}_y \\ \dot{\hat{v}}_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -(\hat{v}_x \omega_x + \hat{v}_y \omega_y + \hat{v}_z \omega_z) \\ (\hat{s} \omega_x - \hat{v}_z \omega_y + \hat{v}_y \omega_z) \\ (\hat{v}_z \omega_x + \hat{s} \omega_y - \hat{v}_x \omega_z) \\ (\hat{v}_x \omega_y - \hat{v}_y \omega_x + \hat{s} \omega_z) \end{bmatrix} \otimes T \quad (9)$$

où $\hat{q} = [\hat{s} \ \hat{v}_x \ \hat{v}_y \ \hat{v}_z]^T \in \mathbb{R}^4$ représente les états estimés (quaternion). Le terme de correction T est calculé à partir d'une fusion de mesures d'accéléromètre et de magnétomètre. Le produit de quaternion introduit dans (9) permet ainsi d'élaborer la fusion entre les trois types de mesures inertielles et magnétiques.

Afin de calculer T , on considère l'erreur de modélisation des mesures du système $\delta(\hat{q}) = (y - \hat{y})$. La sortie estimée $\hat{y}$ est donnée par :

$$\hat{y} = [\hat{f}_x \ \hat{f}_y \ \hat{f}_z \ \hat{h}_x \ \hat{h}_y \ \hat{h}_z]^T \quad (10)$$

Les mesures estimées du champ magnétique $\hat{h}_x$, $\hat{h}_y$, et $\hat{h}_z$ peuvent être calculées par :

$$\hat{h} = [0 \ \hat{h}_x \ \hat{h}_y \ \hat{h}_z]^T = \hat{q}^{-1} \otimes m_q \otimes \hat{q} \quad (11)$$

Le vecteur champ magnétique terrestre est défini dans [19] par $m = [0.5 \cos(60^\circ) \ 0 \ 0.5 \sin(60^\circ)]$ et le quaternion pur relatif est : $m_q = [0 \ 0.5 \cos(60^\circ) \ 0 \ 0.5 \sin(60^\circ)]^T$.

Les mesures estimées de la force spécifique $\hat{f}_x$, $\hat{f}_y$, et $\hat{f}_z$ peuvent être calculées en faisant l'hypothèse que les accélérations linéaires a sont faibles. Ainsi on obtient :

$$\hat{f} = [0 \ \hat{f}_x \ \hat{f}_y \ \hat{f}_z]^T = \hat{q}^{-1} \otimes g_q \otimes \hat{q} \quad (12)$$

où $g_q = [0 \ 0 \ 0 \ 9.8]^T$ représente le quaternion pur associé au vecteur gravité $g = [0 \ 0 \ 9.81]^T$.

La minimisation de l'erreur de modélisation $\delta(\hat{q})$ est effectuée à partir d'une méthode de régression permettant de minimiser le critère d'erreur suivant :

$$\xi(q) = \delta(\hat{q})^T \delta(\hat{q}) \quad (13)$$

Dans ce papier, l'Algorithme de Levenberg Marquardt (ALM) est utilisé comme méthode de minimisation grâce à sa robustesse par rapport à d'autres algorithmes tels que celui de Gauss-Newton ou du gradient [20].

Ainsi la solution unique à ce problème s'écrit comme suit :

$$\eta(\hat{q}) = K \delta(\hat{q}) = k [X^T X + \lambda I_{3 \times 3}]^{-1} X^T \delta(\hat{q}) \quad (14)$$

$X \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ est la matrice Jacobienne définie par :

$$X = -2 \begin{bmatrix} f^x \\ h^x \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} 0 & -f_z & f_y & 0 & -h_z & h_y \\ f_z & 0 & -f_x & h_z & 0 & -h_x \\ -f_y & f_x & 0 & -h_y & h_x & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

où λ est une constante choisie de façon à assurer la non singularité du problème. Généralement, dans ce type de filtre complémentaire, la constante k détermine la fréquence de recouvrement de ce dernier. La variation de la valeur de k entre $0 < k < 1$ [21] permet de privilégier soit les mesures du gyromètre (les hautes fréquences) soit celles de l'accéléromètre et du magnétomètre (les basses fréquences). Afin de pouvoir réaliser le produit de quaternion dans (9), le terme T doit être de dimension 4. Alors T est construit de la façon suivante :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & & & \\ 0 & & K & & & & \\ 0 & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \delta(\hat{q}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

La partie scalaire de $[1 \ \delta(\hat{q})]^T$ est choisie à 1 pour assurer des petits angles de rotation. Le gain K est calculé de la façon suivante :

$$K = k [X^T X + \lambda I_{3 \times 3}]^{-1} X^T \quad (17)$$

Finalement le filtre non linéaire complémentaire s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{s}} \\ \dot{\hat{v}}_x \\ \dot{\hat{v}}_y \\ \dot{\hat{v}}_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -(\hat{v}_x \omega_x + \hat{v}_y \omega_y + \hat{v}_z \omega_z) \\ (\hat{s} \omega_x - \hat{v}_z \omega_y + \hat{v}_y \omega_z) \\ (\hat{v}_x \omega_x + \hat{s} \omega_y - \hat{v}_x \omega_z) \\ (\hat{v}_x \omega_y - \hat{v}_y \omega_x + \hat{s} \omega_z) \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & & \\ 0 & & K & & & \\ 0 & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \delta(\hat{q}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Afin d'évaluer les performances de l'approche proposée pour l'estimation de l'attitude, des tests expérimentaux ont été réalisés en utilisant des mesures réelles à partir de capteurs MEMS. Pour cela, on a choisit d'utiliser une unité inertielle appelée « MTi-G » de Xsens Technologies [22]. Cette station permet de mesurer la force spécifique ($\pm 50m/s^2$), la direction du champ magnétique terrestre ($\pm 750mGauss$) et la vitesse angulaire ($\pm 300deg/s$). De plus, cette station est équipée d'un module GPS qui permet d'améliorer la qualité d'estimation de l'attitude. Les mesures inertielles, magnétiques et les données GPS sont exploitées par l'algorithme interne de la MTi-G (à base de filtre de Kalman étendu) pour calculer l'attitude sous forme de quaternion ou d'angles d'Euler. Elle sera utilisée par la suite comme outil de comparaison pour l'estimation de l'attitude et des accélérations corporelles (référence).

A. Estimation de l'orientation (attitude)

Dans ce travail, les essais expérimentaux ont été réalisés sur un cheval et se sont déroulés dans un club d'équitation (Centre Equestre Reims Université Champagne (CERUC)). Sans pertes de généralités et à défaut de faire des essais sur un manchot royal, l'unité inertielle a été attachée à la tête d'un cheval (figure 2(A)). Durant son mouvement (figure 2(B)), on enregistre seulement les mesures inertielles et magnétiques issues de la MTi-G. Ces données sont utilisées par la suite par le filtre non linéaire (18) pour générer l'attitude estimée. Les essais sur le cheval sont constitués de période de repos et de

phases de mouvement (trot, galop...) avec des accélérations pouvant atteindre $\pm 30m/s^2$. Notons que le filtre non linéaire a été initialisé par la condition aléatoire suivante :

$$q = [-0.5 \ -0.45 \ -0.42 \ -0.5]^T$$

En se basant sur les essais préliminaires dans [16] et un réglage expérimental précis, le gain k dans (14) a été fixé à $k = 0.2$.

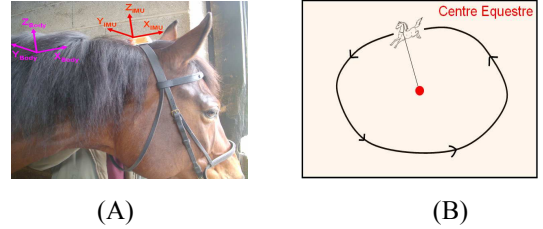


Fig. 2. (A) MTi-G attachée à la tête du cheval (B) Description du mouvement du cheval

La convergence initiale du filtre sur une période de 10sec est montrée dans la figure 3. Notons que la vitesse de convergence est rapide (1 sec). La figure 4 illustre l'erreur en établissant une différence entre le quaternion calculé par la MTi-G et celui estimé par l'approche proposée durant l'essai sur le cheval. Cette figure témoigne de la performance de l'algorithme à reconstruire le mouvement réalisé par la tête du cheval. De plus, ces résultats montrent la capacité du filtre complémentaire à estimer l'attitude de la MTi-G à partir de mesures inertielles et magnétiques et sans recours aux données GPS. Afin de montrer l'intérêt de rajouter des gyromètres dans ce type d'application (Bio-logging), une comparaison est établie entre l'estimation de l'attitude par le filtre non linéaire et deux autres méthodes qui utilisent seulement une combinaison d'accéléromètres et de magnétomètres: l'une proposée dans [10] (que nous appellerons méthode_1) et l'autre dans [9] (méthode_2). Notons que ces deux méthodes génèrent une estimation de l'orientation sous forme d'angles d'Euler. Pour cela l'attitude estimée (en quaternion) à partir du filtre est transformée en angles d'Euler (ϕ : Roulis, θ : Tangage, ψ : Lacet) en utilisant les formules mathématiques données dans [23].

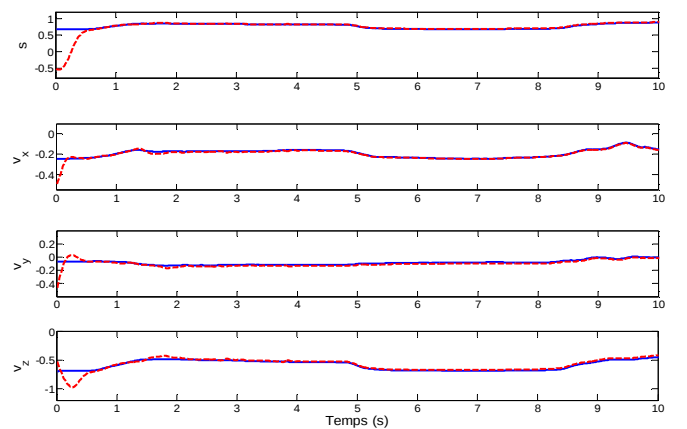


Fig. 3. Convergence initiale du filtre pour l'estimation du quaternion (MTi-G : ligne continue, le filtre non linéaire : ligne discontinue)

Les résultats d'estimation de l'attitude obtenus par les trois approches (méthode_1, méthode_2 et le filtre non linéaire)

sont comparés à ceux donnés par la station inertielle MTi-G pour évaluer leurs précisions. Les résultats de cette comparaison sont donnés dans la figure 5 et montrent les courbes d'erreurs obtenues à travers la différence entre les estimations des angles d'Euler obtenues par la MTi-G et celles fournies par les trois méthodes. A partir de cette figure, on remarque que le meilleur résultat est celui du filtre complémentaire. Cette erreur ne dépasse pas 5 degrés sur les trois angles d'Euler même lors de mouvements haute fréquences de l'animal. Ainsi on peut conclure sur l'intérêt de rajouter des mesures du gyromètre afin de mieux traiter la problématique étudiée. Notons aussi que les résultats d'estimation obtenus par notre filtre sont comparables à ceux fournis par la station MTi-G bien que notre algorithme ne tient pas compte des mesures GPS.

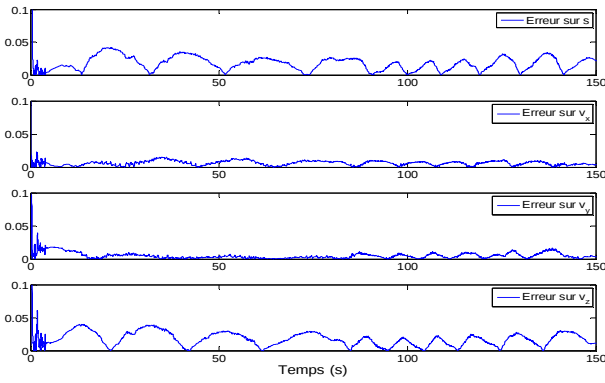


Fig. 4. Evolution de l'erreur d'estimation des composants du quaternion

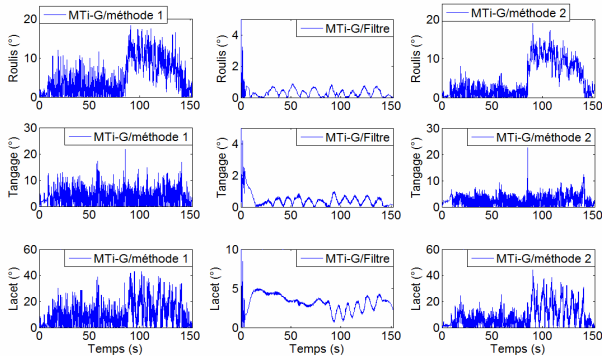


Fig. 5. Evolution de l'erreur d'estimation des angles d'Euler de la méthode_1 [10], du filtre non linéaire et de la méthode_2 [9]

L'évaluation de la performance de chaque méthode peut être établie en utilisant la moyenne quadratique appelée « *RMSD* » (Root Mean Square Deviation). Ce critère permet de mesurer la différence entre les angles d'Euler calculés par la MTi-G (référence) et ceux estimés par chaque méthode. Pour une évaluation plus précise, on choisit d'utiliser le critère suivant avec une fenêtre glissante :

$$RMSD_{glissante}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^{n+k} (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (19)$$

où

x_i : Angles d'Euler calculés par la MTi-G.

$\hat{x}_i$: Angles d'Euler estimés par la méthode choisie.

N : Dimension de la fenêtre choisie égale 2.

Ensuite on effectue une moyenne de la $RMSD_{glissante}$ sur les angles d'Euler pour chaque méthode (Table I).

TABLE I
MOYENNE DE LA $RMSD_{glissante}$ SUR LES ANGLES D'EULER POUR CHAQUE METHODE

Méthodes	Filtre non linéaire	Méthode_1	Méthode_2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Roulis)	0.2860	3.5936	3.2008
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Tangage)	0.3091	2.6340	1.9212
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Lacet)	4.8055	13.0174	11.4340

Notons que les plus petites valeurs de cette moyenne quadratique sont obtenues aussi avec le filtre non linéaire, ce qui confirme son efficacité.

B. Calcul de l'accélération corporelle

Dans une deuxième étape dans ce travail, on s'intéresse au calcul des accélérations corporelles de l'animal durant son mouvement. Pour cela, on exploite les valeurs estimées de l'attitude dans la section précédente, en utilisant le filtre non linéaire, comme suit [16]:

$$\hat{a} = \text{inv}\left(M_N^B(\hat{q})\right) f - g \quad (20)$$

où $M_N^B(\hat{q})$ est la matrice de rotation exprimée en terme de quaternion et définie par (8):

Notons que $g \in \mathcal{R}^3$ est le vecteur gravité et $f \in \mathcal{R}^3$ représente la mesure de l'accéléromètre.

De la même façon, une comparaison est établie entre la norme de l'accélération corporelle calculée par le filtre non linéaire et celle obtenue par la méthode 1 [10] et 2 [9]. Cette norme est définie de la façon suivante :

$$\|\hat{a}\|_2 = \sqrt{\hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2} \quad (21)$$

Notons que l'accélération corporelle fournie par les méthodes_1 et _2 est calculée en utilisant l'attitude estimée par chacune. Par la suite, cette accélération est exploitée dans l'équation (21) pour calculer la norme correspondante. On rapporte dans la figure 6 les résultats de cette comparaison en établissant une différence entre la norme de l'accélération corporelle obtenue par la MTi-G et celle fournie par les trois méthodes. A partir de cette figure, on remarque que la plus petite différence est obtenue avec le filtre proposé dans ce papier. Ainsi ces résultats prouvent les améliorations apportées par l'approche proposée (par le biais des gyromètres) au calcul de l'accélération corporelle de l'animal. Ceci permettra pour les travaux futurs une meilleure évaluation de sa dépense énergétique correspondante. De la même façon, une moyenne quadratique ou $RMSD_{glissante}$ est effectuée pour mesurer la différence entre la norme d'accélération calculée par la MTi-G (référence) et celle estimée par chaque méthode et ceci en utilisant l'équation (19). On note que :

x_i : La norme de l'accélération corporelle calculée par la MTi-G.

$\hat{x}_i$: La norme de l'accélération corporelle estimée par la méthode choisie (filtre non linéaire, méthode_1 ou méthode_2).

La table II regroupe les différentes moyennes de la $RMSD_{glissante}$ sur la norme de l'accélération corporelle pour chaque méthode. On note qu'on obtient la plus petite valeur de cette moyenne en utilisant le filtre non linéaire. Ainsi le critère utilisé témoigne de la capacité du filtre à donner un calcul plus précis du travail locomoteur de l'animal à travers le calcul de ses accélérations corporelles.

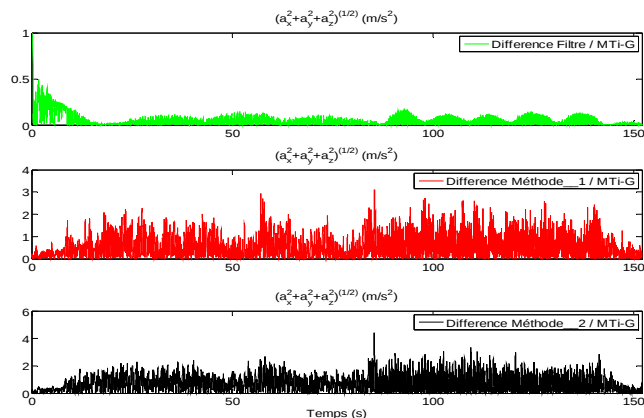


Fig. 6. Erreur d'estimation des accélérations corporelles par la méthode_1 [10], le filtre non linéaire et la méthode_2 [9]

TABLE II
MOYENNE DE LA $RMSD_{glissante}$ SUR LA NORME DE L'ACCELERATION

CORPORELLE POUR CHAQUE METHODE			
Méthodes	Filtre non linéaire	Méthode_1	Méthode_2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$	0.0422	0.4506	0.5745

V. CONCLUSION

Nous avons proposé dans ce travail une autre alternative au problème d'estimation de l'attitude et des accélérations corporelles chez l'animal sauvage. L'approche proposée se base sur un filtre non linéaire couplé à un Algorithme de Levenberg Marquardt. Cet algorithme exploite des mesures de natures différentes à savoir l'accélération, le champ magnétique terrestre et la vitesse angulaire pour estimer l'orientation sous forme de quaternion. Les essais expérimentaux réalisés sur un cheval et l'étude comparative réalisée ensuite prouvent l'amélioration qu'apporte cette approche par rapport aux méthodes de la littérature utilisées en Bio-logging. L'attitude estimée est également exploitée pour calculer les accélérations corporelles de l'animal. Cette information servira dans une étape finale à l'évaluation de ses dépenses énergétiques au cours de ses mouvements. Nos travaux futurs visent à appliquer cet algorithme sur l'espèce étudiée dans le projet à savoir le manchot royal (Terres Australes et Antarctiques Françaises).

REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre du projet «NaviMeles» financé par les régions d'Alsace et Champagne-Ardenne. Les auteurs souhaitent remercier aussi le Centre Equestre Reims Université Champagne (CERUC) pour les aides fournies

durant les essais expérimentaux sur le cheval ainsi que le FEDER dans le cadre du projet Intereg 'C2A'.

REFERENCES

- [1] Thienel. J. et Sanner. R. M. A coupled nonlinear spacecraft attitude controller and observer with an unknown constant gyro bias and gyro noise. *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 48, n° 11, pp. 2011-2015, 2003.
- [2] Vaganay. J., Aldon. M. J. et Fournier. A. Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data. *IEEE International conference on robotics and automation, ICRA, Atlanta, USA, Mai 1993*.
- [3] Zhou. H. et Hu. H. Inertial motion tracking of human arm movements in stroke rehabilitation. *IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, ICMA, Niagara Falls, Canada, Juillet 2005*.
- [4] Rutz. C. et Hays. G. C. New frontiers in biologging science. *Biology letters*, 2009.
- [5] Ropert-Coudert. Y., Beaulieu. M., Hanuise. N. et Kato. A. Diving into the world of biologging. *Endangered Species Research*, 2009.
- [6] Elkaim. G. H., Decker. E. B., Oliver. G. et Wright. B. Marine Mammal Marker (MAMMARK) dead reckoning sensor for In-Situ environmental monitoring. *Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, Avril 2006*.
- [7] Elkaim. G. H., Decker. E. B., Oliver. G. et Wright. B. Initial results from an In Situ Environmental Monitoring Marine Mammal Tag. *Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Mai 2008*.
- [8] Johnson. M. P. et Tyack. P. L. A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 28, n° 1, pp. 3-12, 2003.
- [9] Watanabe. S., Isawa. M., Kato. A., Coudert. Y. et Naito. Y. A new technique for monitoring the behaviour of terrestrial animals; a case of study with the domestic cat. *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 94, pp117-131, 2005.
- [10] Wilson. R., Shepard. E. L. C. et Liebsch. N. Prying into the intimate details of animal lives: use of daily diary on animals. *Endangered Species Research*, vol. 4, pp. 123-137, 2008.
- [11] Fourati. H., Manamanni. N., Afilal. L. et Handrich. Y. Fusion de mesures inertielle pour l'estimation de l'attitude et des accélérations propres. 3èmes Journées Doctorales/Journées Nationales du GDR MACS, Angers, France, Mars 2009.
- [12] Fourati. H., Manamanni. N., Afilal. L. and Handrich. Y. Rigid body motions estimation using inertial sensors: Bio-logging application. 7th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems (including Biological Systems), MCBMS, Denmark, August, 2009.
- [13] Vasconcelos. J. F., Silvestre. C., Oliveira. P., Batista. P. et Cardeira. B. Discrete Time-varying attitude complementary filter. *Proceedings of IEEE American Control Conference, ACC, St. Louis, USA, June 2009*.
- [14] El Hadri. A. et Benallegue. A. Sliding mode observer to estimate both the attitude and the gyro-bias by using low-cost sensors. In *proceedings of the IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, St. Louis, USA, October 2009*.
- [15] Fourati. H., Manamanni. N., Afilal. L. and Handrich. Y. Nonlinear attitude estimation based on fusion of inertial and magnetic sensors: Bio-logging application. The 2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing, ICONS, Istanbul, Turquie, Septembre 2009.
- [16] Fourati. H., Manamanni. N., Afilal. L. and Handrich. Y. A rigid body attitude estimation for Bio-logging application: A quaternion-based nonlinear filter approach. In *proceedings of the IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, St. Louis, USA, Octobre 2009*.
- [17] Chou. J. C. K. Quaternion kinematic and dynamic differential equations. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, n° 1, pp. 53-64, 1992.
- [18] Shuster. M. D. A survey of attitude representations. *Journal of the Astronautical Science*, vol. 41, n° 4, pp. 493-517, 1993.
- [19] Astrosurf : <http://www.astrosurf.com>, Septembre 2009.
- [20] Dennis. J. E. & Schnabel. R. B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization & Nonlinear Equations*, Prentice Hall, Englewood, NJ, 1983.
- [21] Mahony. R., Hamel. T. and Pflimlin. J. M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, n° 5, pp. 1203-1218, June 2008.
- [22] Xsens Technologies : <http://www.xsens.com>, Septembre 2009.
- [23] Phillips. W. F., Hailey. C. E. and Gebert. G. A. Review of Attitude Representations Used for Aircraft Kinematics. *Journal of Aircraft*, vol. 38, n° 4, 2001.