

Compensation dynamique des perturbations magnétiques pour l'estimation d'attitude d'un micro-drone

Julien METGE^{1,2}, Rémi MEGRET¹, Audrey GIREMUS¹, Yannick BERTHOUMIEU¹, Christophe MAZEL²

¹Laboratoire IMS, Bordeaux

²Fly-n-Sense

{julien.metge, remi.megret, audrey.giremus, yannick.berthoumieu}@ims-bordeaux.fr cmazel@fly-n-sense.com

Résumé – Ce papier présente une méthode pour calibrer et compenser les perturbations magnétiques variant dans le temps créées par les câbles électriques sur un mini-drone. La méthode proposée consiste à modéliser ces perturbations à partir des informations sur l'état des différents modules du drone, estimer les paramètres du modèle à partir de mesures de calibration et enfin compenser dynamiquement ces perturbations. L'originalité de la méthode réside en l'utilisation d'information indirectes comme les commandes moteur pour modéliser et compenser dynamiquement les perturbations magnétiques générées. Cette méthode est validée sur des données réelles issues d'un mini-drone. Elle permet une amélioration significative de la qualité de l'estimation du champ magnétique sur les systèmes compacts comme les mini-drones.

Abstract – This paper presents a method to calibrate and compensate dynamically the magnetic field created by wires of different devices in the context of micro robotic attitude estimation. The compensation step consists in mapping available information on the vehicle state to the dynamic magnetic perturbation created by each device and compensate this perturbation. The model parameters used for this mapping are estimated in a prior step thanks to calibration data. The proposed method improves the quality of magnetic measurements and relaxes the distance restriction between sensors and power electronics which is primordial to develop compact systems. We illustrate and validate experimentally our approach on a micro UAV with four rotors.

1 Introduction

Contexte de l'étude Ces dernières années, un nombre croissant de robots autonomes ont été développés afin de remplacer l'homme sur des tâches très variées. Leur miniaturisation est un sujet actif de recherche visant à étendre les champs applicatifs, en particulier pour les mini-drones. Tous ces systèmes ont besoin de se localiser et de mesurer précisément leur environnement pour remplir leur mission de manière autonome. En réduisant la taille des systèmes, les capteurs se trouvent proches des autres organes du robot (moteur, propulsion, batterie, modem radio, etc). Or ces différents modules peuvent générer des perturbations électromagnétique ou mécanique qui modifient les mesures des capteurs.

Parmi tous les capteurs, les magnétomètres sont les capteurs clé permettant d'estimer le cap du robot en mesurant le champ magnétique terrestre. Hybridés avec des gyromètres et des accéléromètres, ils permettent d'estimer l'attitude du robot. Les magnétomètres sont particulièrement sensibles à la présence de matériaux ferromagnétiques et de champs magnétiques parasites. Ces champs parasites doivent être compensés en temps réel par le traitement des signaux pour que le robot effectue correctement sa mission.

Travaux connexes En pratique il n'est pas possible d'isoler les magnétomètres des perturbations en utilisant une configuration matérielle spécifique puisque cette solution isole aussi ces capteurs du champ magnétique terrestre que l'on cherche à mesurer. Une solution souvent proposée sur les satellites consiste à éloigner les magnétomètres de la plate-forme en utilisant un bras mécanique. Mais cette solution est particulièrement contraignante dans le contexte de la robotique terrestre ou aérienne.

Une alternative à une solution mécanique consiste à caractériser et compenser les erreurs générées par le robot lui-même sur le champ magnétique mesuré. Les étapes de calibration classique des magnétomètres permettent de compenser les imperfections du capteur et les perturbations du porteur qui ne varient pas au cours du temps. Cette calibration peut être effectuée hors ligne [1, 2, 3] ou bien en ligne avec des méthodes de filtrage [4, 5, 6].

Cependant, sur un micro-drone (MAV), le champ magnétique créé par les différents modules (notamment les moteurs) varie au cours du temps ; une calibration statique n'est donc pas suffisante. En effet, l'amplitude du champ magnétique créé par un câble électrique est proportionnelle au courant qui le traverse. Si ce courant varie au cours du temps, chaque module important du drone génère un biais dynamique sur les mesures des magnétomètres qui

n'est pas pris en compte par les méthodes de calibration classique.

Ce biais peut être estimé directement si une mesure de courant de chaque module est disponible comme le propose [7] pour un petit satellite. Malheureusement, la plupart des MAVs ne sont pas équipés de capteurs de courant sur chaque module.

Proposition Dans cet article, nous proposons d'estimer et de compenser les perturbations dynamiques du champ magnétique en utilisant des informations indirectes sur les modules du systèmes qui créent ces perturbations. En effet, d'autre informations que le courant sont disponibles comme les commandes des moteurs, l'état de la batterie, le statut des modules (allumés, actifs, passifs etc.). Ainsi nous proposons de modéliser les perturbations associées à chaque module comme une fonction de ces mesures indirectes de l'état du module. Les paramètres du modèle sont ensuite estimés à partir d'un jeu de mesures de calibration. Enfin, la perturbation de chaque module est estimée et compensée en temps réel en fonction de ses changements d'état. Des mesures sur un mini-drone fourni par la société Fly-n-Sense (figure 2) nous permettent de valider cette approche.

La partie 2 présente le modèle du capteur et de la perturbation. La partie 3 décrit la méthode de calibration proposée. Enfin, la partie 4 présente les résultats expérimentaux obtenus permettant de valider l'approche proposée sur un micro-drone représenté en figure 2.

2 Modèle des perturbations

Modèle du capteur La mesure du magnétomètre $\bar{\mathbf{m}}$ est liée au vecteur magnétique \mathbf{m} par un modèle linéaire :

$$\bar{\mathbf{m}}(t) = A\mathbf{m}(t) + \mathbf{b}_s + \mathbf{b}_d(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

où t dénote le temps, A et \mathbf{b}_s correspondent aux termes couramment utilisés pour le problème de calibration statique des magnétomètres [1, 8] ; ε représente le bruit du capteur, considéré comme un bruit blanc gaussien centré. A ces termes de calibration statique s'ajoute le biais dynamique \mathbf{b}_d qui correspond aux champs magnétiques variant au cours du temps générés par le véhicule. Les méthodes de calibration classiques ne prennent pas en compte cette part dynamique de la perturbation ($\mathbf{b}_d = 0$).

Modèle de la perturbation dynamique La figure 1 illustre la perturbation créée par l'un des moteurs de notre drone sur le champ magnétique. Pour cette expérience, le drone est fixé au sol, afin que le champ magnétique terrestre théoriquement mesuré $\bar{\mathbf{m}}_0$ soit constant durant l'expérience. Puis nous augmentons la commande c de l'un des moteurs du drone afin de voir son influence sur la mesure du champ magnétique $\bar{\mathbf{m}}$. Comme le drone

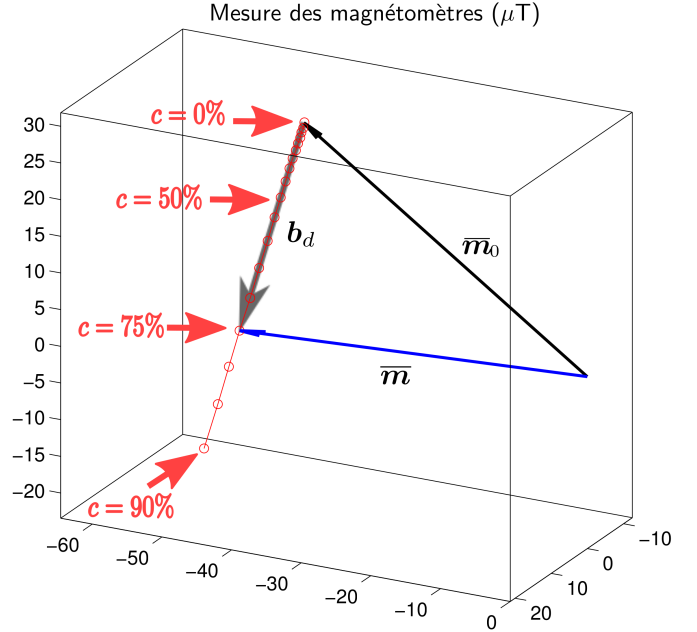


Figure 1: Mesure du champs magnétique lorsque l'on augmente la commande de l'un des moteurs du drone

est statique, les variations du champs magnétique sont uniquement dues au perturbations du moteur.

Pour notre modèle nous considérons d'une part la perturbation totale du magnétomètre \mathbf{b}_d comme une combinaison additive des perturbations \mathbf{b}_d^n créées par N modules indépendants $n \in 1 \dots N$. D'autre part, nous proposons de décomposer la contribution de chaque module en un vecteur unitaire \mathbf{v}_n qui représente la direction de la perturbation, multiplié par une fonction scalaire f qui représente l'amplitude de la perturbation. Ainsi le biais dynamique s'exprime de la façon suivante :

$$\mathbf{b}_d(\mathbf{v}_{1:N}, \boldsymbol{\theta}_{1:N}, \boldsymbol{\lambda}_{1:N}) = \sum_{n=1}^N \mathbf{b}_d^n(\mathbf{v}_n, \boldsymbol{\theta}_n, \boldsymbol{\lambda}_n) \quad (2)$$

$$= \sum_{n=1}^N f(\boldsymbol{\lambda}_n, \boldsymbol{\theta}_n) \mathbf{v}_n \quad (3)$$

Les notations suivantes sont utilisées : $\mathbf{v}_{1:N} = \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N$ et $\boldsymbol{\theta}_n$ est un vecteur de paramètres que nous précisons par la suite. En outre les informations dont on dispose sur chaque module sont regroupées dans un vecteur $\boldsymbol{\lambda}_n$. Par exemple, sur notre drone, chaque moteur représente un module qui est caractérisé par la commande qui lui est appliqué c_n et la tension de la batterie u_n soit $\boldsymbol{\lambda}_n = [c_n, u_n]^\top$. L'amplitude de la perturbation f est modélisée par une fonction multi-polynomiale dépendant de l'état du module $\boldsymbol{\lambda}_n$, soit dans notre cas :

$$f(\boldsymbol{\lambda}_n, \boldsymbol{\theta}_n) = f(c_n, u_n, \boldsymbol{\theta}_n) = \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I a_{ij} u_n^j c_n^i \quad (4)$$

Dans cette équation, $\boldsymbol{\theta}_n = [a_{10} \ a_{11} \ \dots \ a_{20} \ \dots \ a_{IJ}]^\top$

θ_n et v_n représentent les paramètres de calibration de la perturbation dynamique, ils sont estimés lors de la procédure de calibration. Lorsque la commande moteur vérifie $c = 0$, le moteur n'est plus alimenté. Dans ce cas il n'y a pas de perturbation dynamique du champ magnétique ; c'est pourquoi nous limitons le modèle à $i \geq 1$ sur notre système.

3 Calibration

Une première étape consiste à calibrer les perturbations statiques et les imperfections du capteur (paramètre A et b_s). Cette étape est effectuée en utilisant une technique de calibration de la littérature [2, 8] lorsque tous les modules du robot susceptibles de générer des perturbations dynamiques sont éteints.

Une seconde étape permet de calibrer les perturbations dynamiques générées par le robot, elle consiste à estimer les paramètres v et θ . Pour cette étape, chaque moteur est contrôlé indépendamment des autres. Le robot est fixé au sol afin de considérer le champ magnétique induit par l'environnement comme constant. Une mesure de ce champ \overline{m}_0 est effectuée avec l'ensemble des moteurs arrêtés (soit lorsque qu'il n'y a pas de perturbations dynamiques $b_d = 0$). Puis K mesures (indice $k \in 1 \dots K$) du champ magnétique sont réalisées pour chaque moteur en contrôlant son régime afin de couvrir un échantillonnage représentatif de sa plage de fonctionnement.

Après avoir soustrait \overline{m}_0 à ces mesures (cf figure 1), nous obtenons un jeu de mesures de la perturbation \overline{b}_d^n ainsi que l'état $\lambda_{n,k}$ du moteur :

$$\overline{b}_d^n(\lambda_{n,k}) = \overline{m}(\lambda_{n,k}) - \overline{m}_0 \quad (5)$$

Estimation de v v_n est le vecteur unitaire qui caractérise la direction de la perturbation. Il ne dépend pas de la mesure k . Il est estimé en moyennant les directions de perturbation. Dans le cas de faible perturbation, la direction est très instable à cause du bruit du capteur. Pour prendre en compte cette instabilité, la moyenne est pondérée de la manière suivante :

$$\widehat{v}_n = \frac{\sum_k \overline{b}_d^n(\lambda_{n,k})}{\left\| \sum_k \overline{b}_d^n(\lambda_{n,k}) \right\|} \quad (6)$$

Estimation des paramètres de f Des mesures de l'amplitude de la perturbation sont obtenues pour différentes commandes moteur et tension batterie :

$$\overline{f}_{n,k}(\lambda_{n,k}) = \left\| \overline{b}_d^n(\lambda_{n,k}) \right\| \quad (7)$$

Les paramètres $\widehat{\theta}_n$ sont estimés en minimisant l'erreur quadratique suivante :

$$e(\theta_n) = \sum_{k=1}^K \left\| \overline{f}_{n,k}(\lambda_{n,k}) - \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I a_{ij} u_{n,k}^j c_{n,k}^i \right\|^2 \quad (8)$$



Figure 2: L'un des micro-drones utilisé pour évaluer les performances

L'estimateur obtenu est celui des moindres carrés. Le problème étant linéaire par rapport aux paramètres $\{a_{ij}\}$, la solution est calculée simplement au moyen d'une pseudo-inverse.

4 Résultats

La plate-forme expérimentale utilisée est un mini-drone électrique de la société Fly-n-Sense constitué de 4 rotors tel que celui présenté sur la figure 2. Étant donné la grande miniaturisation d'un tel prototype, les magnétomètres sont localisés à 2.5 cm de la carte d'alimentation des moteurs. Les perturbations dynamiques sont donc principalement dues aux câbles d'alimentation des 4 moteurs, considérés indépendamment et caractérisés chacun par un vecteur d'état $\lambda_n = [c_n, u_n]^T$. Les paramètres de calibration statique (\widehat{A} et \widehat{b}_s) ont été estimés par une procédure séparée qui n'est pas l'objet de cet article. D'autre part, une étude sur l'ordre du modèle bi-polynomial pour l'amplitude de la perturbation (eq. 4) nous a permis de choisir $I = 4$ et $J = 1$ pour notre système.

La méthode de calibration dynamique proposée a été testée sur 2 jeux de calibration afin d'effectuer une validation croisée et d'évaluer la précision et la répétabilité de la méthode, puis sur un jeu libre dans lequel tous les moteurs du drone fonctionnent simultanément. Dans toutes ces expériences, le drone est fixé au sol afin que le champ magnétique terrestre soit constant dans le repère du drone durant toute la durée de l'expérience. Les résultats sont évalués en terme d'erreur angulaire entre le champ magnétique terrestre $\widehat{m}_0 = \widehat{A}^{-1}(\overline{m}_0 - \widehat{b}_s)$ obtenu lorsque tous les moteurs du drone sont arrêtés ($b_d = 0$) et le champ magnétique estimé \widehat{m} où :

$$\widehat{m}(t) = \widehat{A}^{-1}(\overline{m}(t) - \widehat{b}_s - \widehat{b}_d^n(\widehat{v}_n, \widehat{\theta}_n, \lambda_n(t))) \quad (9)$$

Évaluation sur les jeux de calibration La table 1 montre les erreurs angulaires commises avec et sans com-

	erreur moyenne		
	jeu 1	jeu 2	jeu libre
sans calib dyn	11.142	10.623	55.853
avec calib 1	0.248	0.635	7.970
avec calib 2	0.483	0.226	7.706

Table 1: Erreur angulaire moyenne en degrés entre le vecteur magnétique de référence et la mesure, avec et sans compensation des perturbations dynamiques, sur les jeux de calibration et dans le cas de commandes quelconques

compensation des perturbations dynamiques du magnétomètre pour chacun des jeux de calibration. Ces résultats montrent une bonne répétabilité de la procédure et une réduction de l'erreur moyenne d'un facteur 15 par rapport à la calibration standard.

Évaluation dans le cas de commandes quelconques

Dans le cas du jeu libre, le drone est fixé au sol alors que nous faisons varier rapidement et simultanément les commandes des 4 moteurs comme s'il était en vol. Les résultats de ce test sont présentés à la figure 3. Même dans ce scénario difficile, la correction des perturbations dynamiques améliore systématiquement l'estimation du champ magnétique. La table 1 montre que la compensation dynamique proposée permet une forte réduction de l'erreur angulaire moyenne. Néanmoins, nous constatons que l'erreur est plus importante dans le cas de variations de commande très rapides (4.5 - 8.5s). En effet, en cas de variations rapides, la dynamique des moteurs n'est pas prise en compte et l'information sur la commande moteur ne correspond pas exactement au régime moteur. Ce problème fait partie des perspectives d'amélioration de la calibration.

5 Conclusion

Sur les systèmes robotiques de petite taille, comme les micro-drones, les modules de puissance du robot génèrent des perturbations magnétiques qui varient au cours du temps en fonction de leur état. Ces perturbations ne sont pas prises en compte par les méthodes classiques de calibration des magnétomètres.

Nous proposons une nouvelle approche afin d'estimer et de compenser dynamiquement ces perturbations en utilisant les informations sur l'état de chacun des modules du robot. Elle repose sur un modèle paramétrique du biais dynamique dont les paramètres sont estimés à l'issue d'une procédure de calibration. Cette méthode a été évaluée sur des données réelles obtenues sur un mini drone. Sur les tests effectués, la compensation mise en place a permis d'améliorer significativement la qualité des mesures des magnétomètres.

Ainsi il est possible de concevoir des systèmes plus compacts tout en maintenant une estimation précise du cap grâce aux magnétomètres.

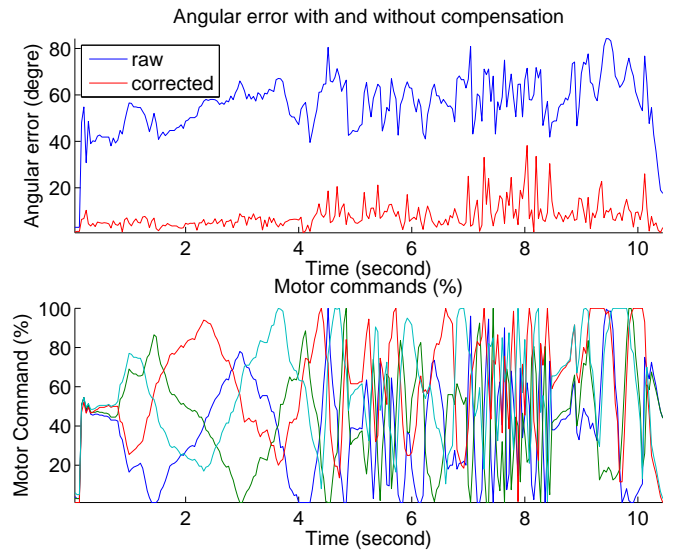


Figure 3: Erreur angulaire sur l'estimation du vecteur magnétique avant et après correction des perturbations dynamiques et les commandes correspondantes des 4 moteurs

Références

- [1] V. Renaudin, M. H. Afzal, and G. Lachapelle, "Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain," *Journal of Sensors*, vol. 2010, pp. 1–10, 2010.
- [2] E. Dorveaux, D. Vissière, A.-P. Martin, and N. Petit, "Iterative calibration method for inertial and magnetic sensors," *ICDC IEEE International Conference on Decision and Control*, 2009.
- [3] J. Vasconcelos, G. H. Elkaim, C. Silvestre, P. Oliveira, and B. Cardeira, "A geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame," in *IFAC Workshop on Navigation, Guidance, and Control of Underwater Vehicles, IFAC NGCUV 2008*, Killaloe, Ireland, 2008.
- [4] J. L. Crassidis, K.-L. Lai, and R. R. Harman, "Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, pp. 115–120, 2005.
- [5] G. Natanson, "Attitude-independent magnetometer calibration for spin-stabilized spacecraft," a.i. solutions, Inc., Tech. Rep., 2005.
- [6] J. E. Sedlak, "Iterative magnetometer calibration," *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*, 2006.
- [7] J. C. Springmann, "Attitude-independent magnetometer calibration with time-varying bias," in *Proceedings of the 25th Small Satellite Conference*, 2011.
- [8] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, and B. W. Parkinson, "A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers," in *8th International St. Petersburg Conference on Navigation Systems*, 2001, pp. 28–30.