

Stabilisation en lacet d'un micro-robot aérien par la vision

Stéphane VIOLLET et Nicolas FRANCESCHINI

Equipe biorobotique UMR Mouvement et Perception,
CNRS/Univ. de la Méditerranée,
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20

[e-mail: \[viollet ou franceschini\]@laps.univ-mrs.fr](mailto:[viollet ou franceschini]@laps.univ-mrs.fr)

Mots Clé : Vision active, capteur optique, micro-balayage, micro-drones, fixation, poursuite

Résumé

Ce travail traite de la conception et de la réalisation d'un capteur visuel qualifié de "neuromimétique" car les principes sur lesquels il repose sont directement inspirés du vivant. Nous nous intéressons à reproduire en hardware certains principes sensori-moteurs présents à bord des animaux. Cette démarche présente un double intérêt : d'une part elle conduit au design de capteurs originaux dont on n'aurait pas nécessairement eu l'idée autrement, d'autre part elle permet de valider un principe biologique et d'en montrer les limites. Nous avons abordé le problème de la "stabilisation par la vision" en concevant un capteur appelé OSCAR (Optical Scanner for the Control of Autonomous Robots). Le principe nouveau sur lequel repose ce capteur visuel est la mesure de la vitesse de défilement d'un contraste par des photorécepteurs décalés spatialement, auxquels on impose un micro-balayage périodique s'inspirant d'une récente découverte faite sur la rétine de la mouche en vol.

Nous présentons une application de ce type de capteur à un mini-robot aérien, auquel il confère deux comportements visuo-moteurs de grand intérêt : la stabilisation en lacet et la poursuite fine d'une cible élémentaire

I. INTRODUCTION

Ce travail traite de la conception et de la réalisation d'un nouveau type de capteur visuel qualifié de "neuromimétique" car les principes sur lesquels il repose sont directement inspirés du vivant. Nous nous intéressons à reproduire en hardware certains principes sensori-moteurs adoptés par le système nerveux des animaux. Cette démarche présente un double intérêt : d'une part elle conduit au design de capteurs originaux dont on n'aurait pas nécessairement eu l'idée autrement, d'autre part elle permet de valider un principe biologique et d'en montrer les limites. L'étude s'appuie sur la théorie, la simulation et la réalisation de circuits électroniques et optroniques. Ces circuits sont ensuite embarqués à bord d'un démonstrateur aérien de très petite taille ($<1\text{dm}^3$) qui devient capable de se stabiliser automatiquement dans un environnement contrasté.

Notre démarche s'appuie sur des études menées au laboratoire sur un micro-aéronef naturel, la mouche, dont les multiples prouesses sont bien connues mais qu'aucun micro-robot n'a encore jamais égalé. Dans un premier temps, nous avons abordé le problème de la "stabilisation par la vision"

en concevant un capteur, appelé OSCAR (Optical Scanner for the Control of Autonomous Robots). Le principe nouveau sur lequel repose ce capteur est la mesure de la vitesse de défilement d'un contraste par deux photodiodes décalées spatialement, auxquelles on impose un micro-balayage périodique inspiré de récentes observations faites sur la rétine de la mouche en vol [1]. Quant à la mesure du mouvement relatif de l'environnement visuel, elle se fait par un circuit DEM (Détecteur Élémentaire de Mouvement) dont le principe est inspiré des neurones détecteurs de mouvement de la mouche [2]. Des simulations [3] ont montré que si les photodiodes balayent l'environnement selon un mouvement de rotation pure à *vitesse variable*, alors le DEM couplé aux deux photodiodes délivre un signal qui dépend de la *position angulaire* du bord contrasté présent dans le champ visuel du capteur.

Une description complète du capteur est faite au chapitre 2. La caractéristique statique entrée-sortie du capteur OSCAR est donnée dans le chapitre 3. Enfin, dans le chapitre 4, une application micro-robotique de ce type de capteur est présentée, qui permet de mettre en oeuvre deux comportements visuo-moteurs de grand intérêt: la stabilisation en lacet et la poursuite fine de cible par un mini robot aérien.

II. DESCRIPTION DU CAPTEUR OSCAR

Un élément essentiel du capteur visuel décrit ici est le Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM), dont le principe électronique [4] fut dérivé de travaux électrophysiologiques réalisés au laboratoire chez la mouche [2]. Ce circuit sert à mesurer la vitesse de défilement d'un bord contrasté. Pour cela, il délivre une impulsion dont l'amplitude est une fonction monotone décroissante de l'intervalle de temps Δt séparant les détections d'un même bord contrasté par deux photorécepteurs adjacents. Plus ce retard Δt est faible (c'est-à-dire plus la vitesse est élevée) plus l'amplitude de l'impulsion délivrée par le DEM est grande. Un bloqueur d'ordre 0 placé en sortie du DEM permet d'obtenir une tension continue.

Dans ce chapitre, nous allons décrire la mise en oeuvre d'un mouvement de micro-balayage rétinien périodique (10Hz) sous la forme d'un mouvement de rotation pure dont l'amplitude (10°) est du même ordre de grandeur que l'angle interrécpteur $\Delta\phi$ (égal à 4°). Nous allons envisager le cas d'un balayage dont la vitesse dépend du temps, et tel que la vitesse angulaire relative $\Omega(t)$ de défilement du contraste

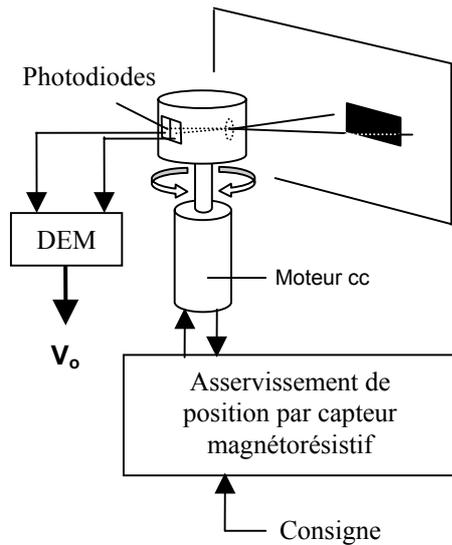


Figure 1. Schéma du capteur visuel à balayage positionné devant un objet contrasté, pouvant être situé entre 0,1m et 2,5m.

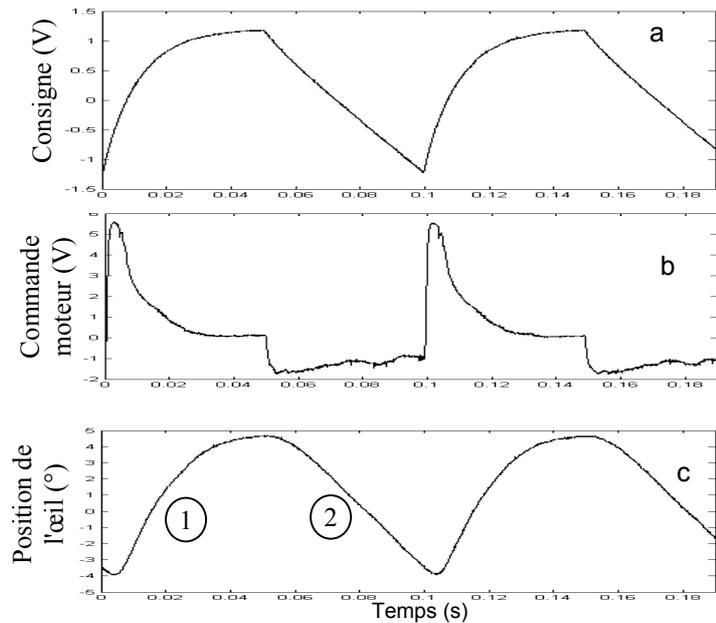


Figure 2. Signaux réels provenant de l'asservissement de position: (a) consigne, (b) commande moteur, (c) orientation de l'œil (photodiodes-lentille) mesurée par le capteur magnétorésistif.

décroît en fonction du temps. C'est cette propriété qui, comme nous allons le voir, va nous permettre d'obtenir un retard Δt variant avec la position angulaire du contraste. Inspirés par des mesures faites chez la mouche [1], nous avons choisi de faire varier $\Omega(t)$ selon une loi en exponentielle décroissante durant une demi période du cycle. Comme la vitesse de balayage varie, le bord contrasté est vu à une vitesse différente (correspondant donc à un retard Δt différent) selon sa position dans le champ visuel du capteur. Par exemple, le bord contrasté sera vu à une vitesse relativement rapide s'il est placé à l'extrémité gauche du capteur, et à une vitesse beaucoup plus faible s'il est placé à l'autre extrémité. Ceci se traduit en sortie du DEM par un signal dont l'amplitude varie avec la *position angulaire* du contraste placé dans le champ visuel.

En résumé, nous disposons d'un capteur ayant un champ de vision très réduit (environ 10°) mais capable de générer un signal continu variant de manière quasi-linéaire avec la position angulaire d'un bord contrasté placé dans son champ visuel. Le capteur est constitué d'une lentille plan-convexe (diamètre 5mm) qui focalise la lumière sur les photodiodes placées près de son plan focal. L'ensemble photodiodes + lentille réalise une sorte d'œil cylindrique monté sur l'axe d'un micro-moteur à axe vertical (figure 1). C'est ce moteur qui imprime à l'œil son microbalayage à 10Hz grâce à un asservissement de position basé sur un capteur magnétorésistif. Le balayage imposé se décompose en deux phases :

- la phase 1 (figure 2c) de balayage à vitesse variable, pendant laquelle le DEM détecte des transitions de contraste blanc-noir (OFF) et délivre un signal (en Volts) dépendant de la position angulaire du contraste vu par le capteur OSCAR.

- la phase 2 (figure 2c) dite "de retour", effectuée à vitesse constante et durant laquelle aucune mesure n'est

faite, puisqu'elle correspond au sens non préférentiel du DEM.

L'étape suivante a consisté à obtenir les caractéristiques d'OSCAR et à quantifier ses gammes de mesure en termes de distance le séparant de l'objet, de niveau de contraste et de largeur de l'objet. Pour obtenir toutes ces caractéristiques, nous avons conçu un banc de test spécifique permettant de tourner finement le capteur (par micro-pas de $0,1^\circ$) autour de son axe vertical devant un panorama simple constitué d'un bord contrasté vertical (blanc/gris) ou d'une fine barre verticale sur fond blanc.

III. CARACTÉRISTIQUES STATIQUES

Le capteur réalisé permet de détecter la présence d'objets jusqu'à 250cm. La figure 3 montre le signal de sortie V_o en fonction de l'orientation φ_c du capteur par rapport à un bord contrasté placé à 250cm ou une fine barre (largeur 1cm) placée à 200 cm. On voit que la fonction de transfert de ce capteur visuel (scanner + DEM) se laisse approximer par un gain $K_s \cong 1V/^\circ$ au voisinage de la position $\varphi_c = 0^\circ$.

Les résultats expérimentaux de la figure 3 révèlent une relative invariance de la réponse du capteur au contraste de l'objet ($m=85\%$, 40% , 12%) Le contraste de valeur 85% correspond à celui mesuré pour un bord noir sur fond blanc. Ces résultats montrent aussi une quasi-invariance de la caractéristique statique d'OSCAR par rapport à la distance de l'objet (gamme de 0,5m à 2,5m) [5]. Également le capteur répond de manière très semblable à un bord contrasté (échelon spatial) et à une fine barre (créneau spatial). Enfin, le capteur OSCAR présente deux autres propriétés qui sont rarement rencontrées dans un système de vision artificielle:

- une acuité bien plus fine que l'angle $\Delta\varphi$ séparant les axes

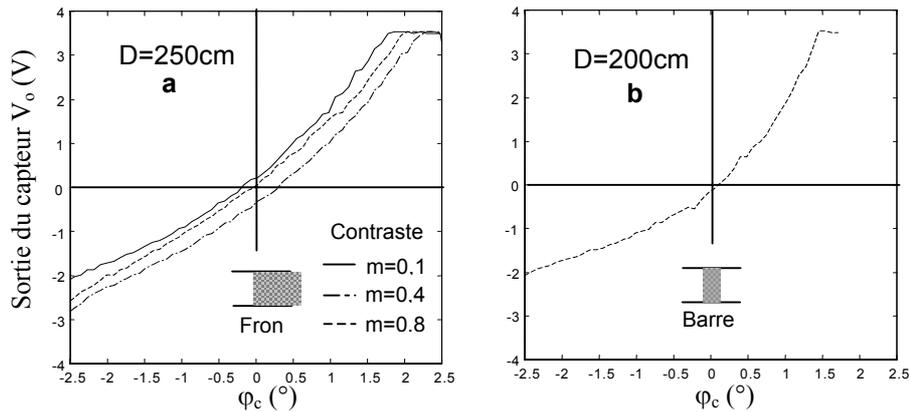


Figure 3. Signal de sortie V_o du capteur à balayage en fonction de son orientation φ_c , du contraste m de l'objet et sa distance D . Les 3 courbes (a) correspondent à la vision d'un bord ("échelon spatial") présenté sur un fond blanc. La courbe b correspond à la vision d'une barre noire de largeur 1cm ("créneau spatial") présentée également sur fond blanc.

visuels des deux photorécepteurs. En effet, le capteur réagit à une rotation de $0,1^\circ$ par rapport à sa cible (figure 3), ce qui correspond à 2,5% de l'angle $\Delta\varphi$.

un *minimum visible* bien plus fin que l'angle $\Delta\varphi$. En effet, le capteur détecte sans problème une barre noire de largeur 1cm à une distance de 200cm, alors qu'elle ne sous-tend qu'un angle de $0,28^\circ$, soit 7,8% de $\Delta\varphi$.

Toutes ces propriétés rendent ce "capteur visuel à balayage" digne d'être incorporé dans une boucle visuo-motrice. En effet, le gain K_s variant peu avec la nature de l'objet, son contraste et sa distance, nous bénéficions d'une robustesse de mesure ayant pour effet de simplifier grandement le régulateur de la boucle visuo-motrice. Le chapitre suivant montre que le capteur OSCAR utilisé à bord d'un robot de petite taille lui permet de se stabiliser dans l'espace et de fixer des cibles mouvantes.

IV. APPLICATION AU CONTRÔLE VISUO-MOTEUR D'UN MINI-ROBOT AÉRIEN

La plateforme de test que nous avons construite pour

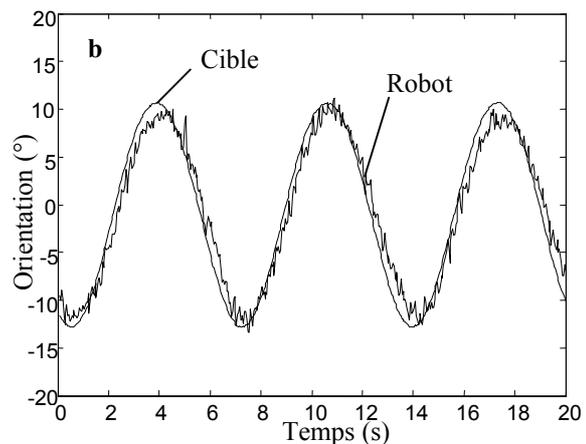
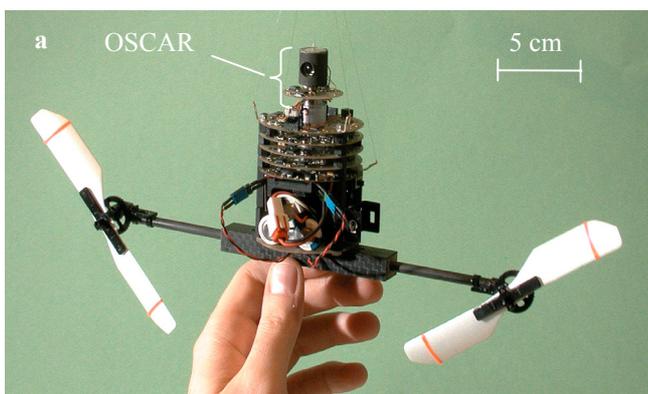


Figure 4. (a) Mini-robot aérien équipé du capteur visuel OSCAR comme partie intégrante d'une boucle visuo-motrice servant à stabiliser l'engin autour de son axe de lacet. Le robot est complètement autonome tant au niveau du traitement du signal (toute l'électronique nécessaire est embarquée) qu'au niveau énergétique (utilisation d'accus LiMnO₂, 9V, 800mAh). (b) Poursuite d'une cible contrastée (échelon spatial dont le contraste est de 40%). La cible se déplace à 130cm du robot, perpendiculairement à son axe de visée et selon une loi sinusoïdale de fréquence 0,15 Hz. Dans cette configuration, la vitesse de translation maximale de la cible (atteinte à la position 0°) est égale à 50cm/s.

Masse totale du robot: 100g + accus = 160g, envergure: 24cm

illustrer une application possible du capteur OSCAR est montrée dans la figure 4.

Cette plateforme est en fait un bimoteur à hélices suspendu au plafond par un micro-fil de nylon de longueur 2m. Cette configuration permet d'obtenir 3 degrés de liberté (2 translations dans le plan horizontal et une rotation autour de l'axe de lacet). Les états du système qui sont commandés sont la vitesse angulaire Ω_r du robot ainsi que son orientation angulaire θ_r par rapport à son axe de lacet. Ces deux états sont commandés grâce à une action différentielle sur la vitesse des hélices. Le robot est pilotable manuellement par radiocommande et l'on constate qu'il est très difficile de l'amener manuellement à garder un cap constant. De plus, le robot que nous avons conçu étant de petite taille, ses faibles constantes de temps mécaniques (liées à sa faible inertie) le rendent particulièrement sensible aux perturbations aérodynamiques. Une assistance au pilotage par l'intermédiaire d'un bouclage en position s'avère donc incontournable. Un bouclage basé sur une mesure de cap par compas magnétique peut poser de sérieux problèmes

si le robot est placé dans un environnement clos soumis à diverses perturbations magnétiques (moteurs, objets métalliques, rayonnement d'un écran...) [6]. Une autre méthode consistant à intégrer la sortie d'un gyromètre pour obtenir une position angulaire peut introduire une dérive notable et demande donc un traitement complexe de compensation de dérive [7]. Nous avons choisi au contraire de mettre en œuvre une boucle *visuo-motrice* de position s'appuyant sur le capteur OSCAR. Nous avons monté le capteur à bord du robot décrit précédemment (la figure 4a montre l'ensemble robot+capteur). Le capteur visuel étant solidaire de la plateforme, sa sortie représente l'orientation θ_r du mini robot par rapport à son environnement visuel (bord contrasté). La figure 5 résume la boucle visuo-motrice que nous avons mise en œuvre à bord du robot.

La boucle de stabilisation en position se décompose en fait en deux boucles élémentaires:

une boucle visuelle (externe) servant à contrôler la *position angulaire* de l'appareil grâce au signal V_o fourni par OSCAR

une boucle inertielle (interne) basée sur un micro-gyromètre et contribuant à améliorer la dynamique de l'asservissement grâce à une action "avance de phase" similaire à celle d'un bouclage tachymétrique.

Configuré selon le schéma de la figure 5, l'appareil se révèle capable de "voir" et de fixer visuellement une cible contrastée placée à 140cm devant lui sans aucune défaillance durant les 18 minutes de l'essai [5]. De plus, si cette cible vient à se déplacer, le robot pilote automatiquement ses hélices de manière à la suivre du regard même lorsqu'elle atteint une vitesse linéaire d'environ 50cm/s à la distance de 130cm, ce qui correspond à une vitesse angulaire de $20^\circ/s$ (figure 4b) [5].

V. CONCLUSION

Un nouveau capteur visuel a été présenté dans cet article. Ce capteur permet de mesurer la *position angulaire* d'un objet contrasté (bord ou barre) placé dans son champ visuel et présente plusieurs caractéristiques aussi intéressantes qu'inattendues pour un œil artificiel :

- il est passif et n'a besoin d'aucune émission de quelque rayonnement que ce soit
- il fournit un signal de sortie relativement invariant par rapport à la distance de l'objet
- il fournit un signal de sortie relativement invariant par rapport au contraste
- il localise un objet contrasté avec une précision 40 fois meilleure que celle imposée par sa résolution statique (espacement entre deux pixels). C'est dire qu'il possède une *hyperacuité*.
- il peut détecter une ligne 14 fois plus fine que l'espacement entre deux pixels

Les deux dernières propriétés jettent un éclairage nouveau sur les phénomènes de micro-balayage rétinien de l'homme et des animaux et ouvrent de vastes champs de réflexions et d'applications. Dans le contexte de nos recherches sur le pilotage visuel de micro-aéronefs, nous avons inséré ce nouveau capteur dans une boucle visuo-motrice et montré qu'il permettait de stabiliser un petit robot aérien (masse: 100 grammes+accus) autour de son axe de lacet [5]. Comparé à un bouclage inertiel classique utilisant un gyroscope pour remonter à la position angulaire du procédé, un bouclage visuel basé sur le capteur OSCAR permet de réaliser une stabilisation fiable et sans dérive. On remarquera que le capteur optique décrit ici, bien que passif, fait appel à un processus de *vision active* puisqu'il exploite un mouvement délibéré de l'œil (micro-balayage) et que ce mouvement même est la clef de sa vision. On remarquera aussi qu'OSCAR utilise une mesure de *vitesse angulaire* pour remonter de manière fiable et sans dérive à une *position angulaire*.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Boyron pour son expertise technique et son aide précieuse tout au long de ce travail. Ces recherches ont été réalisées avec l'aide du CNRS (SDV, SPI, STIC, Cognisciences, Microsystèmes et Microrobotique) et de la CEE (IST/FET).

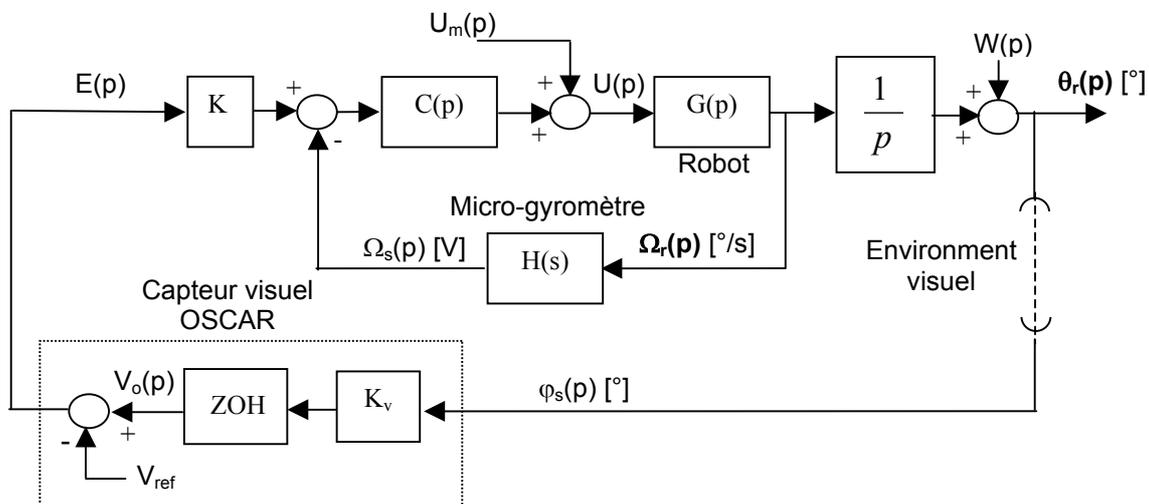


Figure 5. Schéma bloc des différentes boucles sensori-motrices impliquées dans la stabilisation de l'appareil autour de son axe de lacet. Les grandeurs commandées sont la vitesse angulaire Ω_r du robot et son orientation θ_r . Il est possible de commander manuellement l'appareil grâce à U_m .

Références

- [1] N. Franceschini, and R. Chagneux (1997) "Repetitive scanning in the fly compound eye" in: Proc Göttingen Neurobiology Conf, eds. Wässle and Elsner.
- [2] N. Franceschini (1985) "Early processing of colour and motion in a mosaic visual system" in *Neuroscience Research*, Elsevier, Vol. 2, pp.17-49.
- [3] S. Viollet, and N. Franceschini (1999) "Biologically-inspired visual scanning sensor for stabilization and tracking" in Proc IEEE IROS'99, Kyongju, Korea, pp. 204-209.
- [4] C. Blanes (1986) "Appareil Visuel élémentaire pour la navigation "à vue" d'un robot mobile autonome". DEA de Neurosciences, Université d'Aix-Marseille II.
- [5] S. Viollet, and N. Franceschini (1999) "Visual servo system based on a biologically-inspired scanning sensor" in Sensor Fusion and decentralized Control in Robotic Systems II, SPIE Vol. 3839, Bellingham, USA, pp.144-155.
- [6] L. Ojeda, and J. Borenstein (2000) "Experimental results with the KVH C-100 fluxgate compass in mobile robots", in Proc of Conference on Robotics and Applications, Hawaiï, USA.
- [7] B. Barshan, and H. F. Durrant-Whyte (1995) "Inertial navigation systems for mobile robots" in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No 3, pp. 328-342.