



HAL
open science

Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement

Julien Serres, David Dray, Franck Ruffier, Nicolas Franceschini

► To cite this version:

Julien Serres, David Dray, Franck Ruffier, Nicolas Franceschini. Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement. 6ème Manifestation des Jeunes Chercheurs en STIC, Oct 2008, Marseille, France. hal-02298360

HAL Id: hal-02298360

<https://amu.hal.science/hal-02298360>

Submitted on 26 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement*

Julien Serres–David Dray–Franck Ruffier–Nicolas Franceschini

Institut des Sciences du Mouvement, équipe Biorobotique

CNRS/Université de la Méditerranée (UMR 6233)

CP938, 163 avenue de Luminy

F-13288 Marseille cedex 09

{julien.serres ; franck.ruffier ; nicolas.franceschini}@univmed.fr

RÉSUMÉ. Nous avons conçu un pilote automatique dénommé LORA III, qui s'inspire de la vision du mouvement des insectes ailés. Il comporte deux régulateurs de flux optique interdépendants, chacun contrôlant un degré de liberté en translation : un régulateur de flux optique bilatéral contrôle automatiquement la vitesse d'avance du robot, tandis qu'un régulateur de flux optique unilatéral permet au robot d'éviter les obstacles latéraux. Un aéroglisseur totalement actionné est simulé et les résultats montrent qu'il est capable de franchir un corridor fuselé. Il lui faut seulement une paire d'yeux latéraux capables de mesurer les flux optiques droit et gauche. Ce système de guidage visuel minimaliste suffit au robot pour contrôler automatiquement sa vitesse d'avance et sa distance au mur, sans qu'il ait à utiliser ni capteur télémétrique ni capteur vélocimétrique. LORA III est donc un premier pas vers un système de guidage à bas coût, léger, et peu gourmand en énergie, pour micro-aéronefs. LORA III remet en question l'hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux, proposée voici 20 ans pour expliquer le « centrage » des abeilles traversant un corridor.

ABSTRACT. We have developed an autopilot, called LORA III, which is inspired by motion vision in flying insects. It incorporates two interdependent optic flow (OF) regulators, each of which controls one translational degree of freedom: a bilateral OF regulator controls the robot's speed automatically, while a unilateral OF regulator makes the robot avoid lateral obstacles. A fully actuated hovercraft is simulated, and the results show that it is able to cross a tapered corridor. The robot requires only a pair of lateral eyes that measure the right and left OFs. This minimalistic visual guidance system suffices to control both speed and clearance from obstacles automatically, without requiring any speed and range sensors. LORA III is a first step toward a low-cost, lightweight, and power-lean guidance system for micro-air vehicles. LORA III also allowed us to reconsider the "OF balance" hypothesis that was proposed 20 years ago to explain honeybees' "centering behaviour" in a corridor.

MOTS-CLÉS : flux optique, micro-aéronef, vol d'insecte, bionique, biorobotique, biomimétisme.

KEYWORDS: optic flow, micro-air vehicles, insect flight, bionics, biorobotics, biomimetics.

* Ces travaux ont bénéficié de l'aide de S. Viollet, F. Aubépart, M. Boyron, F. Paganucci, et Y. Luparini, et ont été financés par le CNRS (SDV et STIC), par un contrat européen (IST/FET-1999-29043) et par un contrat DGA (2005-0451037).

1. Introduction

Les insectes ailés sont capables de naviguer avec une incroyable agilité en extrayant d'un environnement inconnu des informations visuelles dynamiques engendrées par leur propre mouvement. Le *flux optique*¹ est la vitesse angulaire de « défilement de l'image » projetée sur la rétine (Gibson, 1950). On sait que les insectes se fient au flux optique pour éviter les obstacles latéraux (Srinivasan *et al.*, 1991 ; Serres *et al.*, 2008), pour contrôler leur vitesse (Srinivasan *et al.*, 1996), pour suivre un terrain ou atterrir (Srinivasan *et al.*, 1996 ; Franceschini *et al.*, 2007).

On a pu observer que des abeilles entraînées à traverser un corridor étroit (12 cm) volaient au voisinage la ligne médiane (Srinivasan *et al.*, 1991). Pour expliquer cette *réaction de centrage* de l'abeille, les auteurs ont émis l'hypothèse que l'animal équilibrait ses deux flux optiques latéraux. Inspirés par cette hypothèse d'*équilibre des flux optiques*, des roboticiens ont conçu divers robots mobiles autonomes (Coombs et Roberts, 1992 ; Duchon et Warren, 1994 ; Santos-Victor *et al.*, 1995 ; Weber *et al.*, 1997), ou simulé des drones à voilure fixe (Doncieux et Angeli, 2007). Ces auteurs ont testé la stratégie d'*équilibre des flux optiques* en plaçant leur robot dans un corridor ou dans un canyon. Ils ont parfois ajouté une stratégie basée sur *l'expansion de l'image*, qui permet d'éviter les obstacles *frontaux* en estimant le *temps avant collision* (TTC) à partir de la divergence du flux optique (Duchon et Warren, 1994 ; Weber *et al.*, 1997 ; Doncieux et Angeli, 2007). Certains ont ajouté encore un contrôle de vitesse basé sur le flux optique *bilatéral* (Santos-Victor *et al.*, 1995 ; Weber *et al.*, 1997 ; Doncieux et Angeli, 2007). Malgré le succès en robotique de l'hypothèse d'*équilibre du flux optique*, des expériences comportementales récentes ont montré qu'une abeille ne se centre pas systématiquement dans un corridor (Serres *et al.*, 2008). En effet, dans un corridor plus large (95 cm), on voit l'abeille suivre l'un des deux murs et le maintenir à distance constante. Inspirés par ces résultats nouveaux, reposant sur des enregistrements à haute résolution de trajectoires d'abeilles en vol, nous nous intéressons ici à comprendre comment un insecte, dépourvu de radar et de sonar, peut à la fois *ajuster sa vitesse* et *suivre une paroi* sur la seule base du flux optique.

Nous décrivons dans cet article un pilote automatique bio-inspiré, dénommé LORA III². Il présente une certaine similitude avec le pilote automatique OCTAVE³, dont on a montré qu'il permettait tant à un micro-aéronef qu'à un insecte de suivre un terrain (Ruffier et Franceschini, 2007 ; Franceschini *et al.*, 2007), mais il s'en distingue en ce qu'il s'attache aux double problème du contrôle de la vitesse et de la distance aux parois. Nous avons à l'origine introduit LORA I, un *système de contrôle de cap* basé sur une régulation du flux optique *unilatéral* (Serres *et al.*, 2006a) et pouvant s'appliquer aux véhicules non-holonomes ou sous-

1. De l'anglais « *optic flow* » (Gibson, 1950), parfois aussi traduit en français par *flot optique*.

2. *Lateral Optic flow Regulation Autopilot mark III* (Serres *et al.*, 2008)

3. *Optic flow Control System for Aerospace Vehicles* (Ruffier et Franceschini, 2007)

actionnés. Par la suite, nous avons conçu LORA II&III, systèmes dans lesquels les contrôles de vitesse et de positionnement latéral sont réalisés de manière conjointe, avec deux régulateurs de flux optique distincts mais interdépendants, reposant respectivement sur les mesures de flux optique *bilatéral* et *unilatéral*. LORA III, comme LORA II, s'applique aux véhicules *totalelement actionnés*. Dans la dernière version (LORA III), chacun des deux régulateurs de flux optique (*unilatéral* et *bilatéral*) possède sa propre consigne de flux optique. Cette distinction permet au véhicule qui en est équipé de contrôler *indépendamment* sa vitesse d'avance et son positionnement latéral dans un corridor de largeur donnée, sans avoir à connaître cette largeur.

Nous décrivons au paragraphe 2 l'organisation de la simulation mise en œuvre pour tester le pilote automatique LORA III sur un aéroglisseur miniature. Le paragraphe 3 décrit le fonctionnement même de LORA III et le paragraphe 4 présente les résultats de simulation. Enfin, nous discutons au paragraphe 5 des avantages du pilote automatique LORA III et de ses applications potentielles aux micro-aéronefs. Les comportements engendrés par LORA III sont étonnamment semblables à ceux observés chez l'abeille, apportant ainsi un éclairage original sur les mécanismes potentiels sous-jacents aux comportements visuo-guidés des insectes ailés.

2. Organisation de la simulation

Les simulations ont été faites sur un PC standard équipé du logiciel *Matlab™/Simulink*, avec un pas d'échantillonnage temporel de 1 ms. La simulation robotique inclut (i) le modèle dynamique de l'aéroglisseur dans le plan (X, Y), (ii) la modélisation complète de l'interaction visuelle entre les photorécepteurs et la texture aléatoire tapissant les murs (résolution angulaire $0,005^\circ$), et (iii) le traitement du signal complet relatif aux deux capteurs de flux optique bio-inspirés.

2.1. Modèle dynamique de l'aéroglisseur

Un aéroglisseur équipé de deux propulseurs arrière est dit *sous-actionné*. Notre aéroglisseur, par contre, est *totalelement actionné* grâce à l'adjonction de deux propulseurs *latéraux*, et il peut ainsi se translater de manière indépendante selon X et selon Y (Fig. 1a). Le cap ψ de l'aéroglisseur est supposé stabilisé suivant l'axe du corridor, et fixé à une valeur de référence nulle. Cette stabilisation en rotation est réalisée à partir d'une boucle à verrouillage de cap basée sur un micro compas magnétique. Cette boucle additionnelle compense toute perturbation de cap en contrôlant *différentiellement* les deux propulseurs arrière. Les abeilles elles-mêmes sont équipées d'un système de verrouillage de cap (basé sur la lumière polarisée), qui leur permet de voler en ligne droite même en présence de vent (Riley et Osborne, 2001). Le pilote automatique que nous avons conçu repose donc sur le contrôle de deux translations à partir du flux optique. Il pourrait, en retour, expliquer

la façon dont une abeille contrôle ses deux degrés de liberté translationnels dans le plan (X, Y). Dans l'étude qui suit (supposée « en vol d'intérieur »), l'aéroglesseur n'est aucunement soumis au vent ; sa vitesse sol est donc égale à sa vitesse air.

Nous avons d'abord amélioré les capacités dynamiques de l'aéroglesseur modèle réduit T3-Typhoon (Taiyo Toy Ltd.). L'appareil est désormais équipé de quatre propulseurs carénés de type GWSTM EDF-50 (Fig. 1c) produisant chacun une poussée maximale de 0,72 N sous une tension de 7,2 V. Cette poussée (F_{RT1} , F_{RT2} , F_{LT1} , F_{LT2} , voir Fig. 1a) est proportionnelle à la tension appliquée (<http://www.gws.com.tw>). Un simple gain $K_T = 0,10$ N/V lie la poussée à la tension de commande (U_{Fwd} = tension commune de poussée arrière ; U_{Side} = tension de poussée latérale ; le propulseur latéral gauche seul étant commandé si $U_{Side} > 0$, sinon c'est celui de droite). La dynamique des hélices est négligée vis-à-vis de celle de la plate-forme robotisée. L'aéroglesseur est *totalemment actionné*, chaque composante du vecteur vitesse V_x [1] et V_y [2] est commandée *indépendamment* (Fig. 1a) par sa tension de commande respective U_{Fwd} et U_{Side} :

$$m \cdot dV_x / dt + \zeta_x \cdot V_x = F_{RT1} + F_{RT2} = K_T \cdot U_{Fwd} \quad [1]$$

$$m \cdot dV_y / dt + \zeta_y \cdot V_y = F_{LT2} - F_{LT1} = K_T \cdot U_{Side} \quad [2]$$

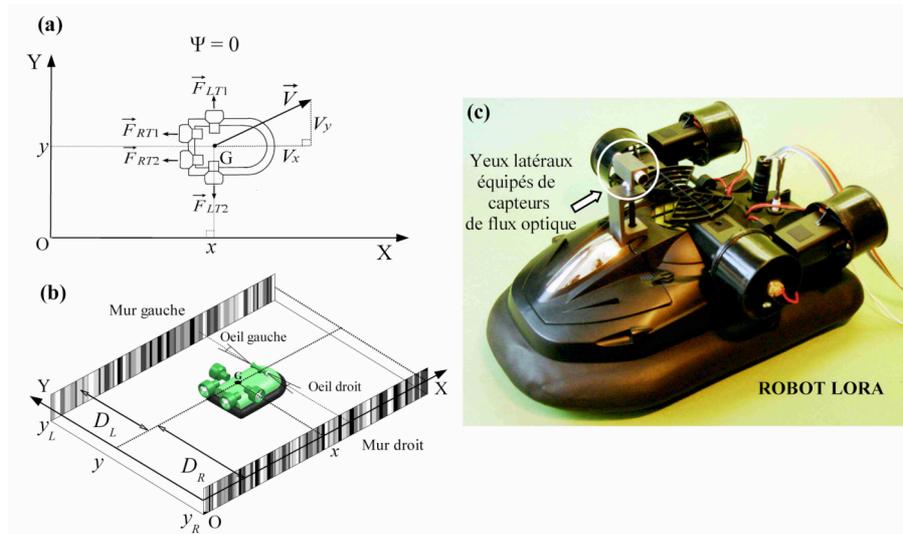


Figure 1. (a) Le vecteur vitesse \vec{V} de l'aéroglesseur se décompose selon les deux axes X et Y : vitesse d'avance V_x résultant de la poussée commune des deux propulseurs arrière ($F_{Fwd} = F_{RT1} + F_{RT2}$) et vitesse latérale V_y résultant de l'un des propulseurs latéraux ($F_{side} = F_{RL1} - F_{RL2}$). Le cap de l'engin est maintenu constant ($\Psi = 0$). (b) L'appareil est équipé de deux yeux latéraux diamétralement opposés et se déplace dans un corridor richement texturé. D_L et D_R sont respectivement les distances aux murs gauche et droit. (c) Robot LORA (dimensions : 0,36x0,21x0,14 m, masse : 0,82 kg incluant les accumulateurs LiPo et l'électronique embarquée).

où m représente la masse totale (0,82 kg) du robot (Fig. 1c), ζ_x et ζ_y sont les coefficients de frottement visqueux translationnels suivant les axes X et Y (la faible vitesse autorisant la linéarisation). Les constantes de temps d'avance $\tau_x = m/\zeta_x$ et latérale $\tau_y = m/\zeta_y$, simulées sont identiques et égales à $\tau_x = \tau_y = 0,5$ s (valeurs correspondant à $\zeta_x = \zeta_y = 1,65$ kg/s). À partir des équations [1] et [2], on peut alors écrire les dynamiques d'avance $G_{V_x}(p)$ [3] et latérale $G_{V_y}(p)$ [4] sous la forme de fonctions de transfert du 1^{er} ordre.

$$G_{V_x}(p) = \frac{V_x(p)}{U_{Fwd}(p)} = \frac{\frac{K_T}{\zeta_x}}{1 + \tau_x \cdot p} = \frac{0,061}{1 + 0,5 \cdot p} \quad [3]$$

$$G_{V_y}(p) = \frac{V_y(p)}{U_{Side}(p)} = \frac{\frac{K_T}{\zeta_y}}{1 + \tau_y \cdot p} = \frac{0,061}{1 + 0,5 \cdot p} \quad [4]$$

2.2. Flux optique engendré par les mouvements propres de l'aéroglesseur

L'aéroglesseur est supposé « voler » au-dessus de la surface plane avec un vecteur vitesse \vec{V} (Fig. 1a,b). Comme les deux yeux se trouvent orientés à $\pm 90^\circ$ de l'axe du couloir (Fig. 1b), ils reçoivent des bandes tapissant les murs un flux optique droit ω_R et un flux optique gauche ω_L , qui s'écrivent respectivement :

$$\omega_R = V_x/D_R \quad (\text{en rad/s}) \quad [5]$$

$$\omega_L = V_x/D_L \quad (\text{en rad/s}) \quad [6]$$

où V_x est la vitesse d'avance de l'aéroglesseur, D_R et D_L sont respectivement ses distances aux murs droit et gauche (Fig. 1b).

2.3. Les capteurs de flux optique

Chacun des deux yeux latéraux contient un capteur de flux optique bio-inspiré (Blanes, 1986), regardant à $\pm 90^\circ$ par rapport à l'axe de symétrie du robot. Chacun d'eux consiste en une paire de photorécepteurs reliés à un circuit *détecteur élémentaire de mouvement* (DEM). Les axes visuels des deux photorécepteurs sont séparés d'un angle $\Delta\varphi = 4^\circ$, et la sensibilité angulaire d'un photorécepteur est une gaussienne tronquée à sa base, de largeur à mi-hauteur $\Delta\rho = 4^\circ$ (champ visuel total : $10,4^\circ$). Un DEM est un circuit non-linéaire comprenant cinq étapes de traitement des signaux photorécepteurs (Blanes, 1986, Aubépart *et al.*, 2007). La sortie d'un DEM est une fonction monotone croissante du flux optique (de $40^\circ/s$ à $400^\circ/s$) (Ruffier et Franceschini, 2007 ; Aubépart *et al.*, 2007).

3. Le pilote automatique LORA III

Le pilote automatique LORA III se compose de deux régulateurs de flux optique interdépendants, chacun contrôlant un degré de liberté en translation (X ou Y), chacun avec sa propre consigne de flux optique. Le flux optique *bilatéral* ([5]+[6]) étant proportionnel à la vitesse d'avance V_x , le régulateur de flux optique *bilatéral* ajuste automatiquement la vitesse d'avance en fonction de la largeur locale du corridor. Le flux optique *unilatéral* ([5] ou [6]) étant à l'inverse de la distance à un mur, le régulateur *unilatéral* ajuste automatiquement la distance au mur *le plus proche* proportionnellement à la vitesse d'avance. La procédure de dimensionnement des correcteurs est décrite dans Serres *et al.* (2008).

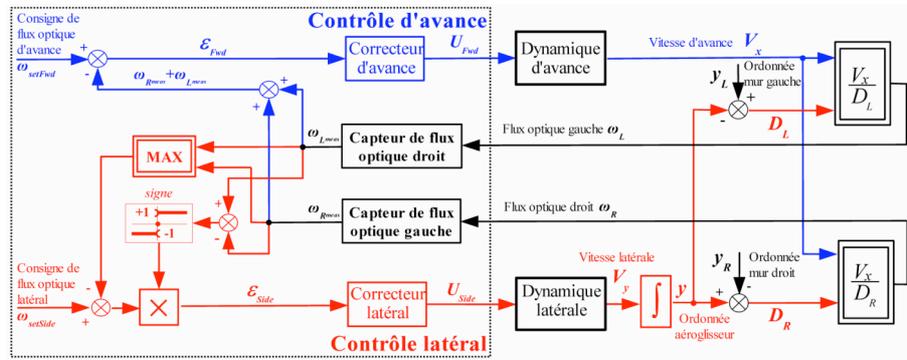


Figure 2. Pilote automatique LORA III (voir texte pour les détails).

Le contrôle d'avance (Fig. 2 schéma-bloc en bleu) est piloté par la commande U_{Fwd} qui ajuste la poussée axiale, déterminant ainsi la vitesse d'avance V_x . Cette commande résulte de l'erreur ϵ_{Fwd} entre une consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd} et la *somme* des flux optiques latéraux mesurés [7]. Le correcteur d'avance (de type PI) vise à annuler cette erreur ϵ_{Fwd} en commandant la dynamique d'avance [3].

$$\epsilon_{Fwd} = \omega_{setFwd} - (\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}) \quad [7]$$

Le contrôle latéral (Fig. 2 schéma-bloc en rouge) est piloté par la commande U_{Side} qui ajuste la poussée latérale, déterminant ainsi la vitesse latérale V_y , et donc le positionnement latéral y . Pour cela, le flux optique *unilatéral* (*max* entre droit et gauche) est comparé à une consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$, produisant ainsi une erreur latérale ϵ_{Side} [8] que le correcteur latéral (de type PD) va s'efforcer de minimiser en commandant la dynamique latérale [4]. L'intégration naturelle liant l'ordonnée y à la vitesse latérale V_y va annuler l'erreur ϵ_{Side} [8] en régime permanent.

$$\epsilon_{Side} = \text{sign}(\omega_{Lmeas} - \omega_{Rmeas}) \times (\omega_{setSide} - \max(\omega_{Rmeas}, \omega_{Lmeas})) \quad [8]$$

4. Résultats de simulation

Comme le montre la Fig. 3, l'aéroglesseur parvient à franchir un corridor fuselé (angle de fuselage $\alpha = 7^\circ$), ralentissant automatiquement dans la partie convergente et accélérant à nouveau dans la partie divergente. Dès son départ à proximité du mur droit ($y_0 = 0,3$ m), on voit le robot adopter un comportement de *suivi de paroi* (conditionné par $\omega_{Side} \geq \omega_{setFwd} / 2$). Le contrôle d'avance ajuste la vitesse (Fig. 3d) pour maintenir le flux optique *bilatéral* au voisinage de $\omega_{setFwd} = 300^\circ/s$ (Fig. 3b). Le contrôle latéral pilote le robot latéralement (Fig. 3a), tentant de maintenir le *plus élevé* des flux optiques *unilatéraux* au voisinage de $\omega_{setSide} = 230^\circ/s$ (Fig. 3c). La vitesse devient alors proportionnelle à la largeur *locale* du corridor (Fig. 3d). Elle décroît, puis croît exponentiellement en fonction du temps (Fig. 3e), avec une constante de temps qui se trouve être une fonction monotone de l'angle α (Fig. 3a).

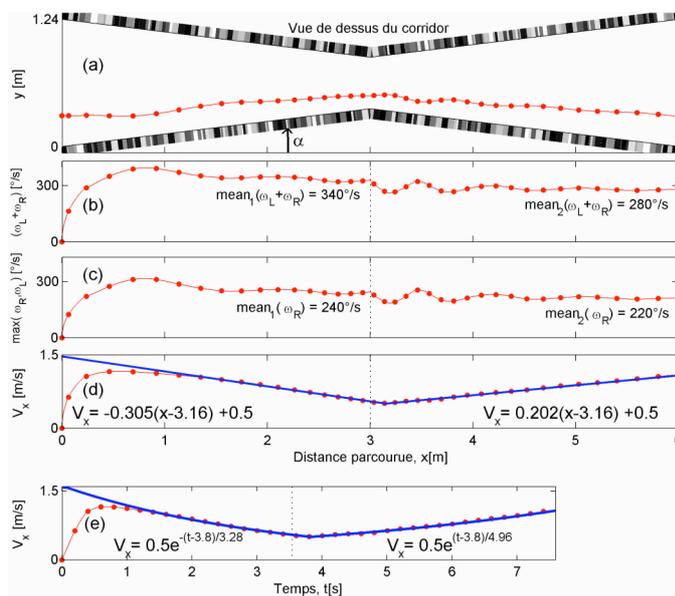


Figure 3. (a) Trajectoire de l'aéroglesseur dans un corridor fuselé d'angle $\alpha = 7^\circ$ (marquage toutes les 0,2s). (b) La somme des flux optiques (droit et gauche) est maintenue à peu près constante. (c) Le plus élevé des flux optiques (droit ou gauche) est maintenu à peu près constant. (d,e) Vitesse fonction de la distance (d) et du temps (e).

5. Conclusion

Notre simulation montre que le pilote automatique LORA III permet à un aéroglesseur miniature de naviguer de façon autonome dans un corridor fuselé (Fig. 3). Des performances similaires sont obtenues pour toute position initiale, dans des corridors stationnaires ou non-stationnaires (Serres *et al.*, 2008). LORA III se contente d'un système visuel minimaliste (de résolution grossière), il permet au véhicule qui en est équipé de contrôler automatiquement sa vitesse et sa distance aux obstacles, *sans faire appel à des capteurs émissifs, vélocimétrique et télémétrique*. LORA III constitue donc un premier pas vers un système de guidage léger et peu gourmand en énergie potentiellement applicable aux microdrones (et drones) à voilure tournante. LORA III pourrait trouver des applications en navigation d'intérieur, là où le signal GPS est reçu de façon intermittente. Pour franchir des

corridors présentant des jonctions en « L » ou en « T », LORA III nécessitera l'ajout d'un module d'évitement frontal basé sur l'expansion de l'image (cf. 1.) LORA III nous a aussi permis de reconsidérer l'hypothèse d'équilibre des flux optiques latéraux (Srinivasan *et al.*, 1991), proposée voici 20 ans pour le guidage visuel des abeilles.

6. Bibliographie

- Aubépart F. and Franceschini N., « Bio-inspired optic flow sensors based on FPGA : application to MAVs », *J. Microprocess. Microsyst.*, vol. 31, no. 6, pp. 408-419, 2007.
- Blanes C., « Appareil visuel élémentaire pour la Navigation à vue d'un robot mobile autonome », *Rapport de Master en Neurosciences*, Université Aix-Marseille II, 1986.
- Coombs D. and Roberts K., « Bee-bot: using peripheral optical flow to avoid obstacles ». In *Intelligent Robots and Computer Vision XI*, SPIE, vol. 1825, pp. 714-721, 1992.
- Duchon A.P. and Warren W.H., « Robot navigation from a Gibsonian viewpoint », In *Proc. Intern. Conf. Systems, Man and Cybernetics* (San Antonio, Texas), pp. 2272-2277, 1994.
- Doncieux S. and Angeli A., « Navigation des drones par flux optique », *Objets volants miniatures : modélisation et commande*, R. Lozano (Ed.), Hermès, pp. 305-328, 2007.
- Franceschini N., Ruffier F., and Serres J., « A Bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities », *Current Biology*, vol. 17, pp. 329-335, 2007.
- Gibson, J.J., « The perception of the visual world », Boston : *Houghton Mifflin*, 1950.
- Riley, J.R. and Osborne, J.L., « Flight trajectories of foraging insects: observations using harmonic radar ». In I.P. Woiwod, D.R. Reynolds and C.D. Thomas, (Eds.), *Insect Movement: Mechanisms and Consequences*, CAB International, pp. 129-157, 2001.
- Ruffier, F. and Franceschini N., « La régulation du flux optique pour le pilotage autonome des micro-aéronefs », *Objets volants miniatures*, R. Lozano (Ed.), Hermès, pp.329-359, 2007.
- Santos-Victor J., Sandini G., Curotto F. and Garibaldi S., « Divergent stereo in autonomous navigation: from bees to robots », *Int. J. Computer Vision*, vol. 14, pp. 159-177, 1995.
- Serres J., Ruffier F., Viollet S. and Franceschini N., « Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours », *Int. J. of Adv. Rob. Syst.*, vol. 3, pp. 147-154., 2006.
- Serres J., Masson G.P., Ruffier F. and Franceschini N., « A bee in a corridor: centering and wall-following », *Naturwissenschaften*, 2008 (sous presse).
- Serres J., Dray D., Ruffier F. and Franceschini N., « A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance », *Aut. Rob.*, vol. 25, pp. 103-122, 2008.
- Srinivasan M.V., Zhang S.W., Lehrer M. and Collett T.S., « Honeybee navigation *en route* to the goal: visual flight control and odometry », *J. of Exp. Bio.*, vol. 199, pp. 237-244, 1996.
- Srinivasan M., Lehrer M., Kirchner W. and Zhang S., « Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees », *Vis. Neurosci.*, vol. 6, pp. 519-535, 1991.
- Weber, K., Venkatesh, S. and Srinivasan, M.V., « Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots ». In M.V. Srinivasan, and S. Venkatesh (Eds), *From Living Eyes to Seeing Machines*, Oxford University Press, pp. 226-248, 1997.