

Boucles visuo-motrices biomimétiques pour le pilotage automatique de micro-aéronefs

Franck RUFFIER, Julien SERRES, Geoffrey PORTELLI, Nicolas FRANCESCHINI

Institut des Sciences du Mouvement, Biorobotique
CNRS / Univ. de la Méditerranée CP938, 163 av. de Luminy
13288 Marseille Cedex 09
franck.ruffier@univmed.fr

Résumé - Les insectes ailés ont résolu des problèmes ardues tels que la stabilisation du vol, l'évitement d'obstacles en 3D, la poursuite de cibles, la navigation, l'odométrie et l'atterrissage sans piste aménagée, problèmes sur lesquels bute encore la robotique autonome contemporaine. Certains principes naturels, éprouvés depuis des millions d'années, peuvent aujourd'hui apporter à la Robotique des idées innovantes. Nous savons depuis 70 ans que les insectes ailés réagissent visuellement aux mouvements relatifs du sol causés par leur mouvement propre [1]. De façon surprenante, cet indice visuel naturel, plus récemment nommé "flux optique" [2], n'a pas encore envahi le champ de l'aéronautique, alors même que les capteurs et les traitements mis en œuvre par le système nerveux d'un insecte au service de son comportement commencent à être clairement identifiés [3]–[11]. Accorder une certaine autorité de vol à un micro-aéronef est une tâche particulièrement difficile ; en particulier pendant le décollage, l'atterrissage, ou en présence de vent. Construire un aéronef de quelques grammes ou dizaines de grammes équipé d'un pilote automatique demande alors une démarche innovante. C'est donc vers une démarche bioinspirée résolument tournée vers les insectes ailés qu'ont choisi certains auteurs pour tenter de résoudre les problèmes inhérents au décollage, au contrôle de la vitesse, à l'évitement d'obstacles, à la réaction au vent, ou bien encore l'atterrissage par le flux optique [12]–[33].

Mots-clé - Biorobotique, Flux Optique, Robotique aérienne, Pilote automatique, Vision naturelle

I. INTRODUCTION

S'inspirer des animaux pour concevoir des robots, c'est s'inspirer de systèmes qui fonctionnent parfois depuis plusieurs centaines de millions d'années et qui ont résolu des problèmes semblables à ceux qui se posent aujourd'hui aux robots pour percevoir, se mouvoir, éviter les obstacles, retrouver un gîte, ... La Biorobotique se distingue par le fait qu'elle cherche plus spécifiquement à modéliser les traitements sensori-moteurs des animaux. La modélisation de ces traitements permet de tisser des liens étroits entre perception et action chez l'homme et l'animal. La Biorobotique permet de faire "d'une pierre deux coups" : d'une part, elle procure aux robots de nouvelles capacités de mobilité, d'autre part, elle jette une lumière nouvelle sur les modèles biologiques. La validation des modèles peut ainsi se faire en soumettant le robot aux mêmes conditions expérimentales que les animaux. Avec des robots dotés de capacités sensorielles et calculatoires minimales, on peut établir un modèle minimaliste des ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche donnée. À partir d'études comportementales ou neurophysiologiques, on peut émettre des hypothèses sur les boucles sensorimotrices naturelles utilisées par les animaux. Ces hypothèses peuvent ensuite être testées sur des robots et conduire à des comportements innovants. Il s'agit souvent de bouclages et de réflexes intelligents dépassant la traditionnelle boucle "perception, modélisation, décision, action" qui demande bien souvent une trop grande capacité calculatoire. Ces boucles sensori-motrices biomimétiques relient des capteurs et des actionneurs dont les fonctions sont biologiquement plausibles pour doter le robot d'un comportement à la fois recherché et connu chez l'animal. Le bioroboticien recherche ainsi dans

la gigantesque “banque de données naturelles” des solutions à des problèmes réputés difficiles, comme la miniaturisation des systèmes embarqués qui imposent de sévères contraintes en termes de taille, de masse, et d’énergie. Le but est d’identifier le principe et de réaliser le traitement sensori-moteur, dont il sait qu’ils ont été largement optimisés pour une certaine niche écologique au cours de la phylogenèse (théorie de l’évolution de Charles Darwin, 1859). Une fois compris, ces traitements peuvent ensuite être retranscrits en utilisant un support technologique alternatif, comme l’électronique, pour reproduire le système sensori-moteur d’un animal. Dans cette revue de l’état des recherches sur les pilotes automatiques basés sur le flux optique, nous présenterons d’abord brièvement les projets en robotique aérienne d’inspiration biologique, puis les projets utilisant le flux optique pour l’évitement d’obstacles et le pilotage de la vitesse et de l’altitude. Enfin, nous présenterons brièvement trois projets de pilotes automatiques bio-inspirés menés dans l’équipe Biorobotique à Marseille.

II. PROJETS DE ROBOTIQUE AÉRIENNE D’INSPIRATION BIOLOGIQUE

Depuis le début des années 90, plusieurs auteurs ont tenté de rendre autonomes des micro-aéronefs en se tournant vers des traitements sensori-moteurs longuement éprouvés par la Nature [12], [14], [16], [18], [19], [22], [24], [25], [27], [34], [35]. Un vol stationnaire a été tenté sur un mini-hélicoptère équipé d’un système de vision du mouvement, mais l’objectif fut finalement atteint en évaluant les mouvements de l’appareil à partir d’une caméra placée au sol [17]. Le projet MFI (Micro-Flying Insect) à Berkeley puis aujourd’hui le projet de R.J. Wood à Harvard ont pour objectif de réaliser une véritable mouche artificielle instrumentée de capteurs biomimétiques [35], [36]. D’autres auteurs ont proposé des pilotes automatiques pour la navigation aérienne en utilisant un algorithme évolutif susceptible de converger vers une solution adaptée à l’environnement d’évolution [37], [38]. Cette démarche – qui retrace en quelque sorte la phylogenèse en accéléré – s’appuie directement sur la phylogenèse, et demande soit une modélisation fine de l’environnement, soit une expérimentation exhaustive “en situation” et délivre une solution qui peut être trop spécifique à l’environnement d’évolution choisi.

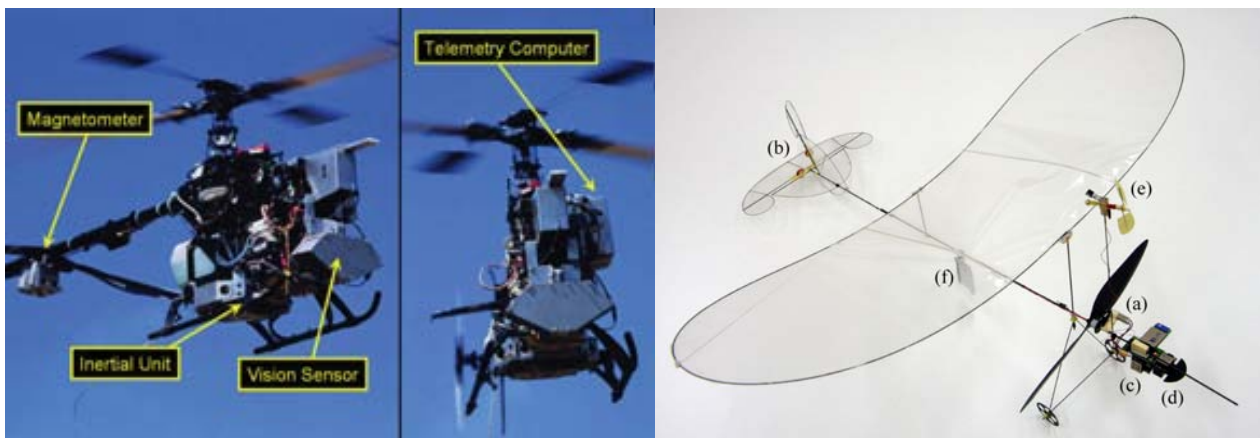


Fig. 1. Hélicoptère électrique Hirobo Eagle de 8kg où le calcul du flux optique est réalisé au sol [39]; MicroCeline de 10g où le capteur de flux optique est à bord [32].

Plus récemment, quelques auteurs ont mis en œuvre sur un avion ou un hélicoptère modèle réduit de plusieurs centaines de grammes, des pilotes automatiques basés sur le flux optique [22], [39]–[41]. D’autres ont équipé un micro-aéronef à voilure fixe de moins de 100 g [25], [29] de capteurs de flux optique (Fig. 1). Malgré leur succès, ces pilotes automatiques ne permettent pas encore d’automatiser toutes les tâches nécessaires au vol libre d’un micro-aéronef, comme le décollage, l’atterrissage précis, le vol dans une forêt d’obstacles, la réaction aux vents ou même le contrôle de la vitesse.

III. LE FLUX OPTIQUE POUR L'ÉVITEMENT D'OBSTACLES ET LE PILOTAGE DE LA VITESSE ET DE L'ALTITUDE

Durant les années 1980, quelques robots mobiles guidés par le flux optique sont apparus notamment grâce à la mise au point d'algorithmes de calcul du flux optique à partir de séquences d'images (e.g., [42], [43]) ou la mise au point de capteurs de flux optique dédiés [44], [45]. Contrairement aux sonars, radars, ou LIDAR habituellement utilisés en robotique mobile, la vision du mouvement (ou flux optique) utilise des capteurs non-émissifs, ce qui les rend particulièrement intéressants pour une utilisation à bord de micro-aéronefs, qui souffrent de contraintes sévères en termes d'énergie embarquée.

La navigation par flux optique n'utilise pas de carte, car elle accomplit des tâches d'évitement d'obstacles sans avoir recours à une représentation interne de l'environnement ([46] pour la revue biorobotique ; [47] pour la revue en robotique). Le premier robot du genre doté d'une navigation par flux optique fut le robot-mouche [5], [48], [49]. Equipé d'un oeil panoramique dans le plan, ce robot se déplaçait à une vitesse constante et relativement élevée (50 cm/s) tout en mesurant le flux optique de translation engendré par sa locomotion. À la fin d'une translation élémentaire à vitesse constante, le robot s'arrêtait puis se dirigeait dans la direction où la distance aux obstacles était la plus grande, tout en maintenant sa consigne de but (se diriger vers une source lumineuse). Les distances étaient évaluées en calculant le quotient vitesse/flux optique.

A. La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux

Au début des années 1990, il a été montré que les abeilles utilisaient le flux optique latéral pour naviguer au sein d'un couloir étroit [50], [51]. Pour expliquer la position centrale adoptée par l'abeille appelée "centering response", les auteurs ont émis l'hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux [50], [51]. Depuis ces observations sur les abeilles, plusieurs stratégies utilisant le flux optique ont vu le jour concernant à la fois l'évitement d'obstacle et le contrôle de la vitesse des robots mobiles et aériens. La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux fut rapidement appliquée en robotique. Dès 1992, [52] l'ont mise en oeuvre sur un robot mobile autonome, dénommé *bee-bot*. Une paire de caméras était montée à ± 30 deg de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot. Chaque caméra permettait de mesurer le flux optique latéral (droit ou gauche); la variation de cap du robot était ensuite contrôlée par la différence des flux optiques latéraux. Indépendamment de la vitesse du robot ($V_{bee-bot} = 0,1$ m/s) et de la largeur locale D du corridor, la variation de cap du robot devenait alors proportionnelle à la variation de distance $\Delta D = D_R - D_L$ du robot par rapport à la ligne médiane du corridor. Dès 1994, Duchon et Warren [53] critiquèrent la stratégie d'équilibre des flux optiques latéraux pour son incapacité à éviter les obstacles frontaux. Pour surmonter cet inconvénient, ils proposèrent de placer une caméra frontale, puis de diviser son champ de vue (60deg) en deux parties latérales pour calculer les flux optiques droit et gauche. Le champ visuel frontal permettait également de mesurer l'expansion de l'image (i.e., la divergence du flux optique) pour évaluer le temps-avant-impact (ou TTC pour time-to-contact) [54], [55]. Lorsque ce dernier était trop faible, le robot s'arrêtait et tournait de 90deg par rapport à la direction du TTC le plus élevé des deux parties latérales. La progression du robot était relativement lente (4 cm/s) à cause de la relative lenteur du calcul du flux optique obtenu par une méthode différentielle. Au total, la stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux fut mise en oeuvre à bord de nombreux robots mobiles terrestres ([13], [52], [53], [56]–[64]), ou aériens (dirigeable : [34]; aéroglisseur simulé : [65]; hélicoptère simulé : [27]; hélicoptère réel ; [62]; drone à voilure fixe : [66]) circulant dans des corridors ou des canyons (naturels ou urbains). Des travaux visant à optimiser cette loi de contrôle ont récemment démontré que les réactions du robot étaient optimales pour une paire de caméras orientées à ± 45 deg de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot [67].

La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux permet à un robot de naviguer le long de la ligne médiane d'un corridor, qui est en soi une position d'équilibre instable car résultant de l'évitement simultané des murs droit et gauche. En présence d'une ouverture latérale, le robot s'engouffrera tout naturellement

dans l'ouverture. De simples correcteurs proportionnels furent utilisés pour piloter le cap du robot [27], [52], [53], [57], ou bien encore des correcteurs proportionnels-dérivés (PD) pour stabiliser le robot en présence d'obstacles latéraux [13]. Par contre, l'introduction d'une action intégrale déstabilise la boucle d'équilibrage des flux optiques latéraux [13].

B. La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral

Santos-Victor et ses collaborateurs [13], [56] reprirent l'idée des deux caméras placées de façon divergente vers l'avant (cf. [52]) en dotant leur robot mobile, dénommé *Robee*, de nouveaux comportements. Pour gérer la présence d'ouverture latérale, *Robee* détectait l'annulation de l'un des deux flux optiques latéraux et changeait de stratégie. La stratégie de suivi de paroi avait pour but de maintenir le flux optique unilatéralement tout en faisant avancer le robot à vitesse constante. Le robot opérait alors un suivi de paroi à une distance "pré-définie" (définie comme le quotient vitesse/flux optique). La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral (soit droit, soit gauche) couplée à une vitesse d'avance constante fut testée sur de nombreux robots mobiles dans des arènes ou des corridors présentant soudainement une ouverture latérale [13], [29], [57], [58]. Pour stabiliser cette tâche de suivi de paroi, seuls des correcteurs PD ont été utilisés [13], [29], [57] du fait que la dynamique latérale pilotée par le couple de lacet est déjà composé de deux intégrations dans la chaîne directe. Le maintien du flux optique unilatéral fut appliqué sur des robots mobiles dont les vitesses d'avance "pré-réglées" étaient relativement faibles (8 cm/s chez [13]; 12 cm/s chez [57]; 10 cm/s chez [68]). De plus, malgré ces faibles vitesses d'avance, le choix d'un pilotage de cap pour effectuer un suivi de paroi générerait des trajectoires plus ou moins oscillantes (Fig. 2).

C. Le pilotage de la vitesse d'avance par le maintien du flux optique bilatéral

Le robot *Robee* pilotait sa vitesse d'avance en maintenant le flux optique moyen bilatéral (droit plus gauche) égal à une consigne donnée par une table de correspondance en forme de sigmoïde [13]. Une telle table de correspondance permet de limiter naturellement la vitesse du robot : le robot se déplaçait donc à une vitesse relativement faible (8 cm/s). Le contrôle de la vitesse d'avance, basé sur le maintien du flux optique bilatéral, fut testé sur de nombreux robots mobiles [13], [15], [57], [59], [61] dans des corridors rectilignes ou fuselés.

D. Stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image

Des stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image, notamment pour estimer le *Time To Contact*, furent testées sur de nombreux robots mobiles [53], [59], [63], un hélicoptère simulé [27], des avions miniatures [25], [29], et un dirigeable miniature [69].

E. La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée

La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée [28], [65] tente de reconstruire un observateur d'état de robot à partir d'un développement en série de Fourier du flux optique perçu de façon panoramique. Il se trouve que certains des coefficients de cette série de Fourier dépendent, par exemple, de la position latérale, de l'orientation ou de la vitesse du robot. Cette théorie fut récemment appliquée sur un robot mobile équipé d'un capteur circulaire (40 flux optiques mesurés en différents azimuts) pouvant se déplacer jusqu'à 21 cm/s [64]. Ce robot est alors capable de se centrer dans un corridor d'une largeur ~ 1 m présentant un coude à 45deg à mi-chemin [64].

F. La stratégie de maintien de flux optique ventral

Des études comportementales chez l'abeille ont montré que cet insecte maintenait constant son flux optique ventral lors de l'atterrissage [9]. En modélisant les trajectoires d'atterrissage, les auteurs en sont venus à énoncer une "stratégie d'atterrissage" imposant deux règles devant être respectées pour réaliser un atterrissage automatique [10] : (i) maintenir un angle de descente constant, (ii) ajuster sa vitesse par

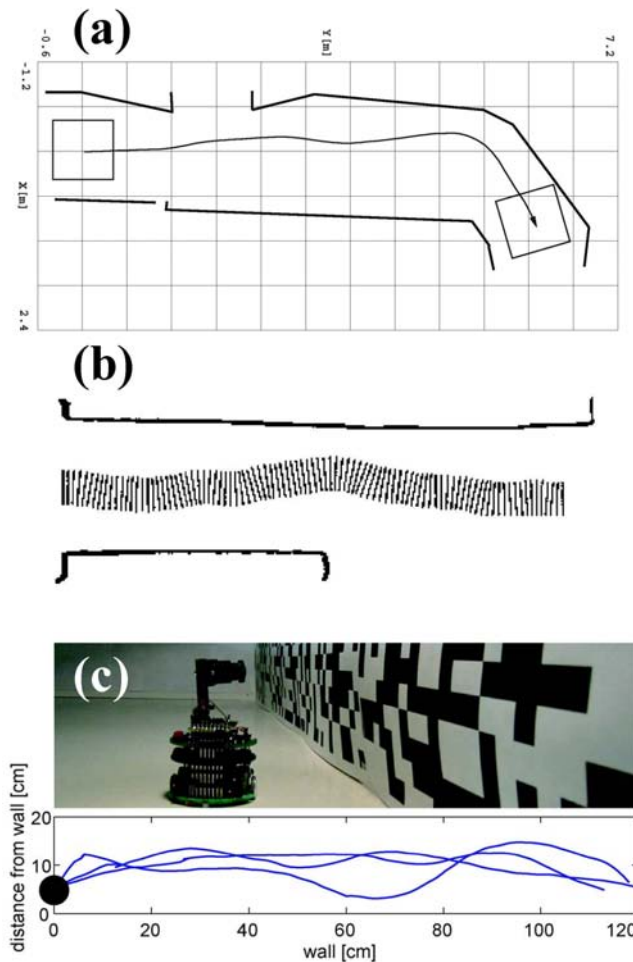


Fig. 2. Comportements de suivi de paroi obtenus en robotique mobile en utilisant la stratégie de “ maintien du flux optique unilatéral couplée à une vitesse d’avance constante”. (a) Réaction à une ouverture latérale de type porte (d’après [13]), (b) Réaction à une large ouverture (d’après [57]), (c) Suivi de paroi d’un robot *Khepera* dans une arène (d’après [68]).

rapport à l’air de façon à maintenir constante la vitesse de défilement de l’image sur la partie ventrale de l’œil. Sans préciser comment l’abeille pouvait bien faire pour respecter ces deux règles, ces auteurs ont ensuite rejoué en boucle ouverte ces deux règles sur un bras robotisé sans malheureusement y associer ni les dynamiques et ni les capteurs présents sur une abeille. Plusieurs auteurs ont essayé de maintenir le flux optique ventral en agissant sur la gouverne de profondeur d’un aéronef à voilure fixe, malheureusement avec un succès limité [16], [22], [25]. En effet, le couplage complexe des dynamiques d’un aéronef à voilure fixe ne permet pas de commander séparément la force de sustentation et la force propulsive. Le pilote automatique OCTAVE décrit ci-après résout ce problème en s’appuyant sur un système complètement actionné à savoir un micro-hélicoptère (le robot *OCTAVE*) : ainsi la boucle de régulation du flux optique pilote directement la force de sustentation et donne naissance à de nombreux comportements recherchés dont l’atterrissage automatique.

IV. LE PROJET OCTAVE POUR PILOTER L’ALTITUDE

Le pilote automatique OCTAVE (Fig. 3) [20], [24], [26], [31], [33], [70] s’appuie sur une hypothèse des années 1950 selon laquelle un insecte naviguerait avec une “vitesse rétinienne préférée”. La formalisation de cette hypothèse nous a conduits à proposer un principe générique de régulation du flux optique,

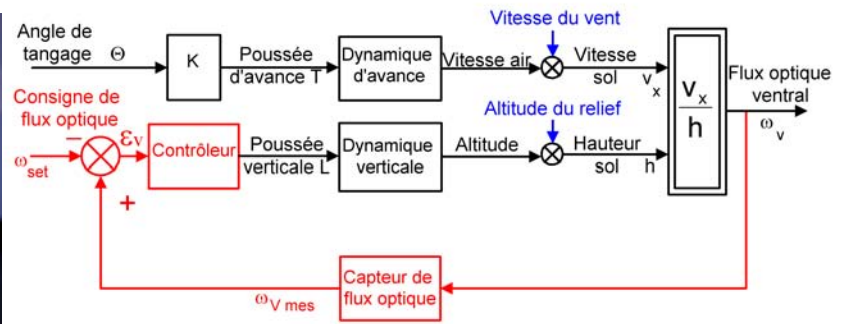
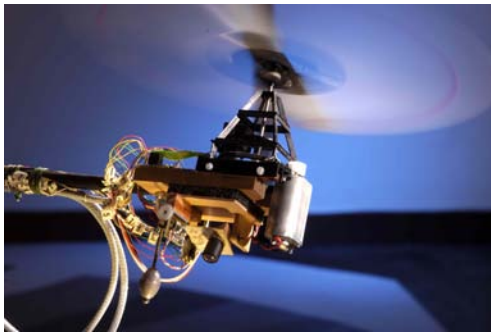


Fig. 3. Robot et pilote automatique OCTAVE pilotant la force de sustentation pour maintenir constant le flux optique ventral [26], [31].

principe que nous avons validé en le mettant en œuvre à bord d'un micro-hélicoptère captif de 100 g. L'appareil est doté d'un œil élémentaire équipé d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) [44], [45], [70], [71]. Ce "DEM électronique" est directement inspiré des neurones détecteurs de mouvement de la mouche, longuement analysés auparavant au laboratoire par des enregistrements électrophysiologiques unitaires associés à des microstimulations lumineuses unitaires de photorécepteurs identifiés [6]. À bord du robot *OCTAVE* comme à bord de la mouche, un DEM est capable d'estimer la vitesse rétinienne de l'image du sol, c'est-à-dire le flux optique ventral généré par les mouvements propres de l'agent survolant un terrain contrasté. Nous avons montré qu'une boucle de régulation du flux optique conduit automatiquement l'appareil à éviter les collisions avec le sol et à effectuer un suivi de terrain. Mieux encore, une simple commande de tangage conduit l'appareil à décoller ou à atterrir automatiquement. Ces performances sont étonnantes eu égard au caractère minimaliste du traitement réalisé à bord. Le pilote automatique ne régule aucunement sa vitesse (qu'il ne connaît pas), pas plus que son altitude (qu'il ne connaît pas non plus). Le pilote automatique *OCTAVE* régule le flux optique ventral qu'il perçoit grâce au capteur de flux optique à son bord. Le système proposé se révèle donc performant car il permet à un aéronef de naviguer en sécurité sans avoir besoin des capteurs aéronautiques traditionnels tels que radio-altimètre, radar Doppler ou GPS, variomètre, servant respectivement à mesurer la hauteur sol, la vitesse sol et la vitesse de descente (capteurs réputés pour leur encombrement, leur masse, leur consommation et leur coût énergétique).

Pour résoudre le problème de la navigation en terrain accidenté, le robot *OCTAVE* a été doté d'un second œil couplé à un nouveau DEM électronique regardant vers l'avant (Fig. 4) : le robot mesure donc également son flux optique frontal. Il a été décidé d'ajouter à la première boucle de rétroaction sur le flux optique ventral, une seconde boucle d'anticipation utilisant le flux optique frontal. Grâce à cette nouvelle stratégie composée de deux boucles distinctes mais complémentaires, le micro-aéronef captif est capable de naviguer proche du sol malgré la présence d'un relief très accidenté avec des pentes de l'ordre de 20 degrés.

Le pilote automatique *OCTAVE* nous a finalement permis de mieux comprendre les prouesses comportementales et énergétiques des animaux volants. Lorsqu'un insecte (ou un oiseau) vole au-dessus du sol, l'image du sol défile d'avant en arrière dans la partie ventrale du champ visuel, créant également un flux optique ventral qui dépend à la fois de la vitesse sol et de la hauteur sol. Pour expliquer comment ces animaux parviennent à éviter le sol, nous avons proposé l'hypothèse selon laquelle la navigation des insectes (ou des oiseaux) dépend essentiellement d'une boucle de rétroaction visuelle (nous l'avons appelée "régulateur de flux optique") commandant la force de sustentation. Cette hypothèse s'est cristallisée petit à petit à partir de nos expériences avec le robot *OCTAVE* qui, avec son capteur et son régulateur de flux optique, devient capable de prouesses comportementales. Le schéma de contrôle proposé explique 70 ans

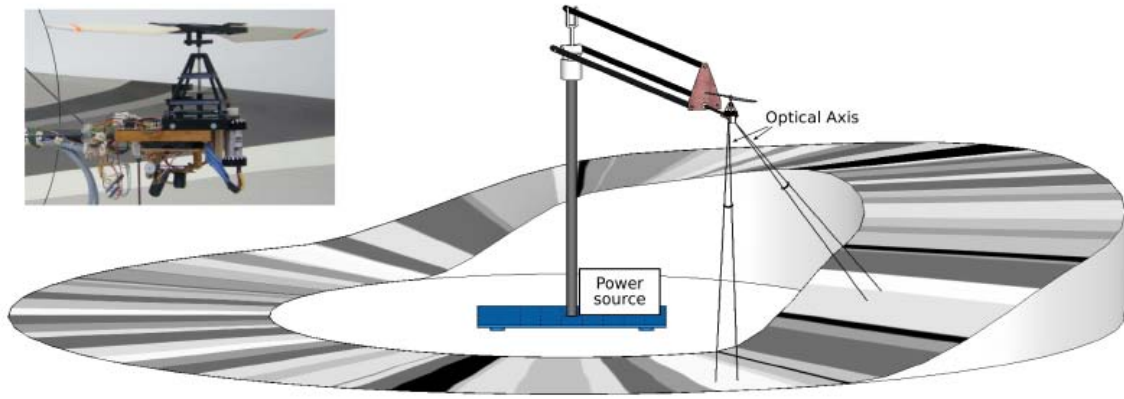


Fig. 4. Robot captif OCTAVE, équipé en 2008 de 2 yeux mesurant respectivement le flux optique ventral et frontal, et volant au-dessus d'un relief accidenté tapissé de contrastes [33].

d'observations, parfois surprenantes, sur le comportement des insectes et des oiseaux, par exemple le fait :

- que les insectes descendent par vent de face [3] et s'élèvent au contraire par vent arrière,
- que les abeilles atterrissent à pente constante [9], [10],
- ou encore que les abeilles se noient en traversant une eau dormante [72].

Le schéma de contrôle explique également comment les insectes migrateurs utilisent l'augmentation de la vitesse du vent avec l'altitude pour parcourir de plus longues distances sans épuiser leurs ressources énergétiques à lutter contre les vents. Ces animaux parviennent à voler, même en condition de vent défavorable, sans mesurer ni leur hauteur sol, ni leur vitesse sol, ni leur vitesse de descente, ni leur angle de descente, c'est-à-dire sans utiliser aucun des capteurs aéronautiques conventionnels. Le "régulateur de flux optique" est peu exigeant en termes de traitement et de substrat neuronal, et apparaît donc très adapté aux faibles dimensions d'un cerveau d'insecte (ou d'oiseau).

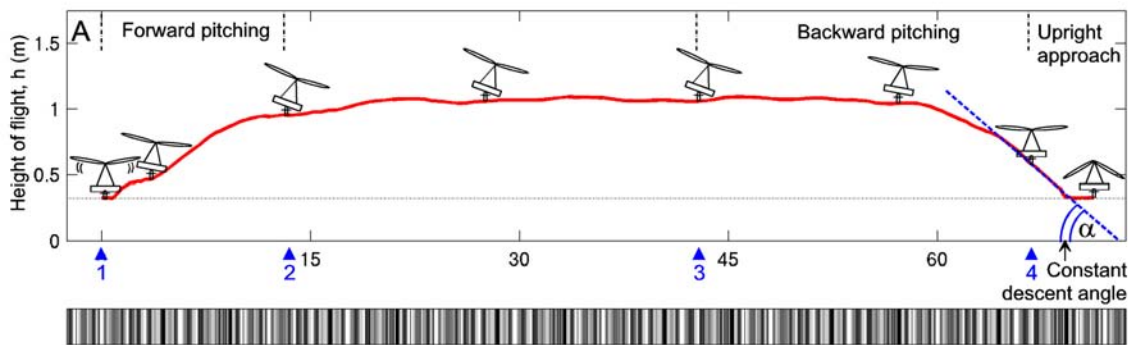


Fig. 5. Trajectoire du robot OCTAVE : le maintien du flux optique constant conduit le robot à décoller automatiquement dès lors qu'il bascule vers l'avant et à atterrir automatiquement dès lors qu'il se redresse. L'atterrissage est même réalisé automatiquement à angle constant comme les avions commerciaux mais sans utiliser d'instruments présents au sol [31].

À l'instar de l'insecte volant, un micro-aéronef équipé d'un régulateur de flux optique pourrait profiter automatiquement du vent pour parcourir de plus longues distances [24], [26] et surtout atterrir à pente constante [31] (Fig. 5), reproduisant ainsi la descente et l'approche finale des insectes (et des aéronefs commerciaux modernes) - sans utiliser aucun instrument émissif, ni à bord, ni au sol.

V. LE PROJET LORA POUR PILOTER VITESSE D'AVANCE ET DISTANCES AUX MURS

Nous avons récemment étendu ce concept de “régulation du flux optique” à l'évitement d'obstacles latéraux en focalisant notre réflexion sur la navigation dans le plan horizontal. Un agent simulé navigue, jusqu'à une vitesse relativement élevée (1 m/s), sur la base d'un pilote automatique “visuo-moteur” que nous avons conçu et appelé LORA (Lateral Optic flow Regulation Autopilot). Ce pilote automatique LORA [30] associe deux boucles de régulation du flux optique latéral en parallèle pilotant chacun un degré de liberté qui lui est propre :

- 1) Un premier régulateur de flux optique ajuste la vitesse de telle sorte que la somme des flux optiques latéraux est maintenue constante. La conséquence intéressante est que le robot simulé avance d'autant plus rapidement que l'environnement est moins encombré.
- 2) Un second régulateur de flux optique ajuste la position latérale de manière à maintenir constant le flux optique à droite ou à gauche. Le robot simulé longe alors le mur à une distance proportionnelle à sa vitesse d'avance déterminée en (1) : plus le robot vole rapidement, plus il s'éloigne des obstacles.

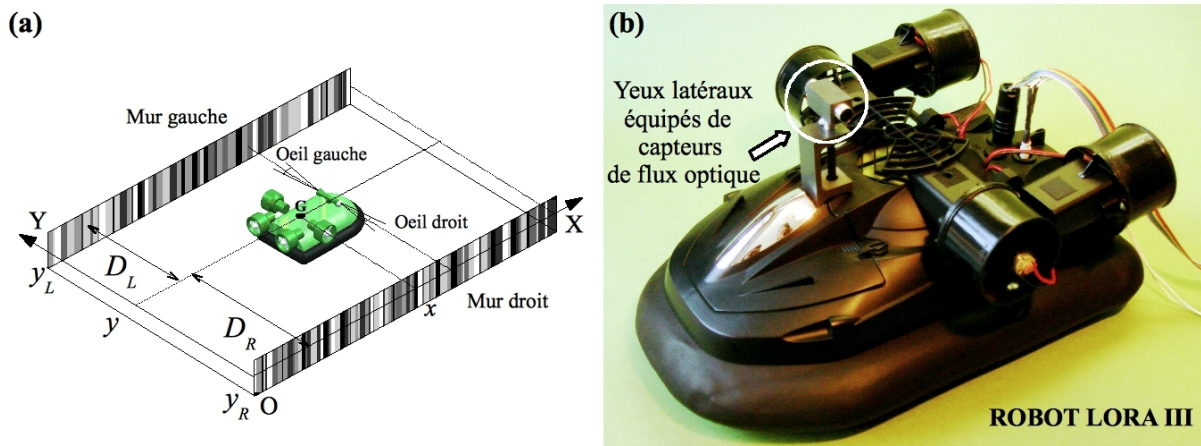


Fig. 6. Robot LORA capable en simulation de contrôler automatique sa vitesse et sa distance au mur sur la seule base des flux optiques droit et gauche (Robot en cours de mise en œuvre au laboratoire) [30].

Les simulations ont montré que, dans un couloir dont les murs sont tapissés de motifs contrastés, le robot simulé équipé de LORA réalise automatiquement un suivi de paroi en contrôlant simultanément sa vitesse d'avance et son positionnement latéral (Fig. 6). L'avantage considérable de ce système est que le robot simulé n'a besoin de mesurer ni sa vitesse ni sa distance au mur – au contraire des systèmes embarqués traditionnels. Le principe apporte, en retour, une explication plausible sur la manière dont un animal – et l'homme lui-même – peuvent naviguer en évitant les obstacles latéraux, en n'utilisant ni vélocimètre ni télémètre.

Pour mieux comprendre comment les abeilles évitent les obstacles latéraux en ajustant vitesse et position, un banc expérimental a été construit permettant de mesurer, par vidéo à haute résolution, la vitesse et la position d'abeilles entraînées à voler dans un couloir (longueur 3m, largeur 1m) [11] (Fig. 7). Il a été montré que la vitesse d'une abeille et sa distance au mur (de droite ou de gauche) étaient maintenues proportionnelles l'une à l'autre, à tout instant et en toutes circonstances. Cela signifie que le rapport entre vitesse et distance à un mur est maintenu constant, ce rapport vitesse/distance définit précisément le flux optique latéral. Nos résultats comportementaux obtenus chez l'abeille nous permettent de :

- Remettre en cause une hypothèse datant du début des années 90 selon laquelle l'abeille équilibrerait les flux optiques droit et gauche pour naviguer dans un tunnel [51],

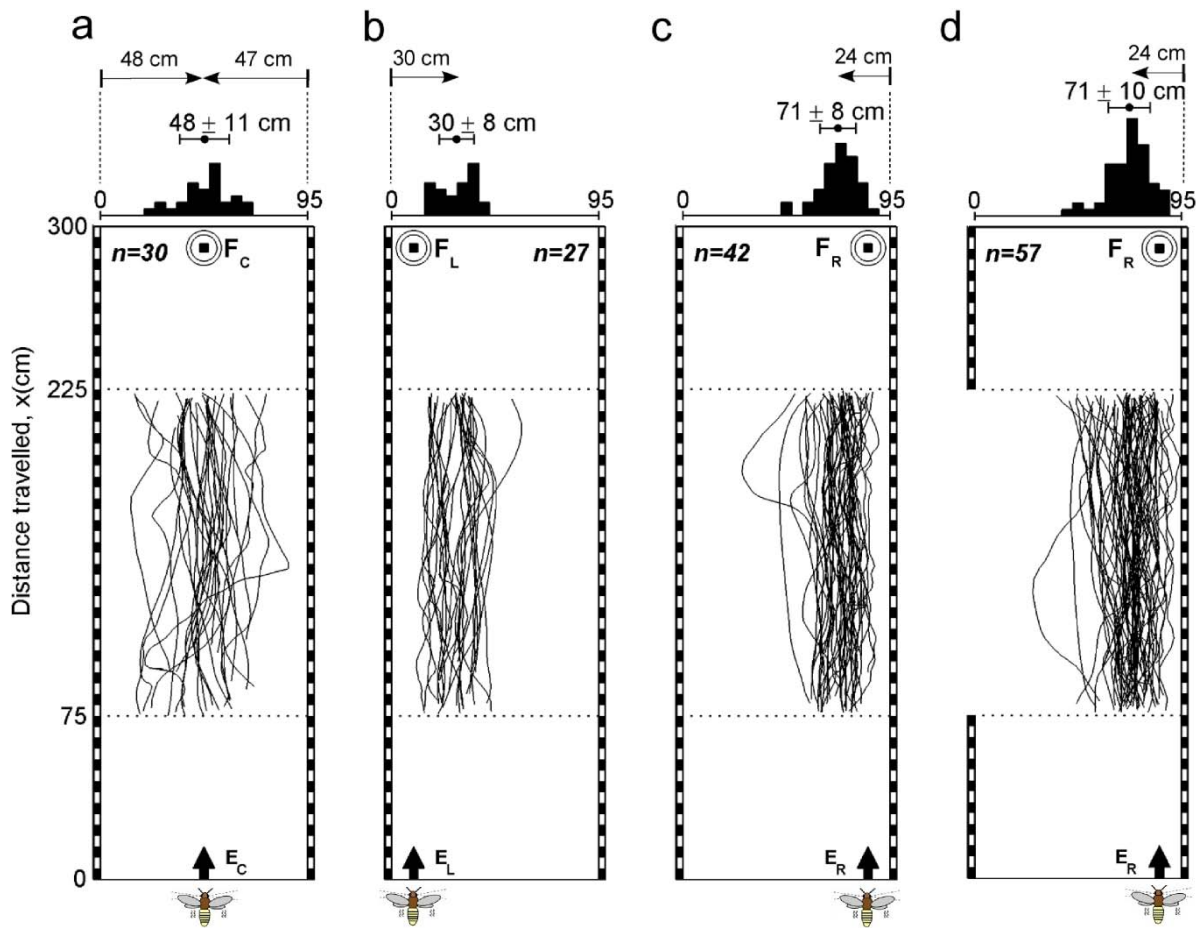


Fig. 7. Trajectoires d'abeilles entraînées à voler dans un tunnel horizontal. Leur trajectoire dépend de leur position initiale dans le tunnel. Ainsi les abeilles peuvent suivre le mur de droite ou de gauche, et n'équilibrent en aucun cas leurs flux optiques droit et gauche. Les expériences suggèrent au contraire que l'abeille régule son flux optique droit ou bien son flux optique gauche [11].

- Suggérer aussi une nouvelle hypothèse basée sur une régulation du flux optique latéral qui permet à l'abeille soit de se centrer, soit de suivre un mur, consolidant ainsi le caractère biomimétique de notre pilote automatique LORA III.

VI. LE PROJET ALIS POUR LE PILOTAGE 3D

Les insectes volants sont capables de naviguer dans les 3 dimensions en environnement inconnu en se basant sur le flux optique engendré par leur propre déplacement. Le but du projet ALIS (AutopiLot using an Insect based vision System) [73] est d'étendre aux trois dimensions (x,y,z) le principe de régulation du flux optique : le pilote automatique conçu permet ainsi de naviguer en 3D dans un tunnel (Fig. 8).

La dynamique de l'abeille a été simulée selon ses trois degrés de liberté en translation (x,y,z). L'abeille simulée est équipée d'un système visuel minimaliste composé seulement de quatre capteurs de flux optique (2 latéraux, 1 ventral, 1 dorsal), sous la forme de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM). La clé du fonctionnement de ce pilote automatique réside dans les deux régulateurs de flux optique qui tendent à réguler (= maintenir constant) le flux optique perçu en agissant d'une part sur la poussée d'avance, d'autre part sur la poussée latérale ou verticale. L'avantage de ce système visuo-moteur est encore qu'il fonctionne sans aucune mesure explicite de vitesse ou de distance. Le pilote automatique ALIS ne requiert donc ni capteur de vitesse ni capteur de distance. Cette solution biomimétique ouvre la voie à des systèmes

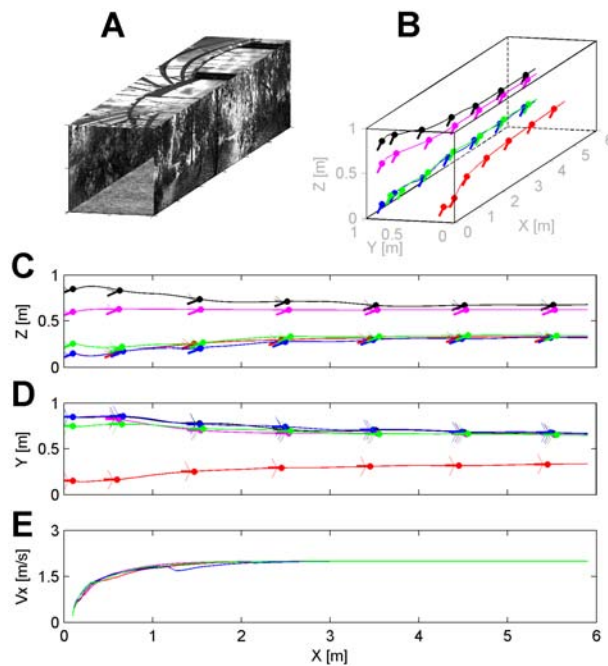


Fig. 8. Trajectoires de l'abeille simulée, volant dans un tunnel 3D, pour différentes positions initiales [73].

de guidage visuel légers, peu gourmands en énergie, et susceptibles d'être appliqués aux micro-aéronefs autonomes de demain.

VII. CONCLUSION

Pour éviter les obstacles (ventraux, frontaux ou latéraux), les robots mesurent encore aujourd'hui leur distance aux obstacles en utilisant des capteurs dits télémétriques (à radar, à laser ou à ultrasons), plus ou moins précis mais surtout encombrants et gourmands en énergie, car émissifs. Depuis plusieurs décennies pourtant, on sait que les insectes utilisent leur vision du mouvement pour éviter le sol et les obstacles latéraux, et cela grâce à des neurones spécialisés appelés Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM), capables de mesurer la vitesse de défilement de l'image rétinienne, appelée aussi flux optique. Ainsi, de nombreux auteurs utilisent aujourd'hui des boucles visuo-motrices basées sur la mesure du flux optique pour piloter des robots terrestres ou aériens. Bien que les interactions entre ces multiples boucles visuo-motrices restent encore méconnues chez les animaux, leur usage réduit considérablement les ressources calculatoires et énergétiques des circuits, et partant, leur taille, leur consommation et leur masse. Ces boucles visuo-motrices biomimétiques sont appelées à avoir un succès grandissant pour le pilotage automatique des véhicules miniatures de demain.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier Stéphane Viollet pour son soutien et ces remarques pertinentes tout au long de ces projets. Nous remercions également M. Boyron, F. Paganucci, Y. Luparini et S. Amic pour leurs expertises techniques.

REFERENCES

- [1] J. Kennedy, "The visual responses of flying mosquitoes," *Proceedings of the Zoological Society of London*, vol. 109, pp. 221–242, 1939.
- [2] J. Gibson, *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin, 1950.

- [3] J. S. Kennedy, "The migration of the desert locust (*Schistocerca gregaria* forsk.)," *Phil. Trans. Royal Soc. B*, vol. 235, pp. 163–290, 1951.
- [4] W. Reichardt, *Movement perception in insects*, W. Reichardt, Ed. Academic Press, 1969.
- [5] J.-M. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini, "Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors," in *Proc. of SPIE Conf. on Mobile Robots IV*, W.J. Wolfe and W.H. Chun, Eds. Bellingham, U.S.A. : SPIE Vol. 1195, 1989, pp. 44–53.
- [6] N. Franceschini, A. Riehle, and A. L. Nestour, *Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons*. D.G. Stavenga, R.C. Hardie, Eds., Springer, Berlin, 1989, pp. 360–390.
- [7] K. Hausen, *The lobula-complex of the fly : structure, function and significance in visual behaviour*. Plenum, 1984, pp. 523–559.
- [8] T. Collett, H. Nalbach, and H. Wagner, *Visual stabilization in arthropods*. Elsevier, 1993, pp. 239–263.
- [9] M. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal : visual flight control and odometry," *J. Exp. Biol.*, vol. 199, pp. 237–244, 1996.
- [10] M. Srinivasan, S. Zhang, J. Chahl, E. Barth, and S. Venkatesh, "How honeybees make grazing landings on flat surfaces," *Biological Cybernetics*, vol. 83(3), pp. 171–183, 2000.
- [11] J. Serres, M. G. F. Ruffier, and N. Franceschini, "A bee in the corridor : centering and wall-following," *Naturwissenschaften*, vol. 95, pp. 1181–1187, 2008.
- [12] F. Mura and N. Franceschini, "Visual control of altitude and speed in a flying agent," in *From Animals to Animals III*, D. Cliff et al., Eds. Cambridge, U.S.A : MIT Press, 1994, pp. 91–99.
- [13] J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation : from bees to robots," *International Journal of Computers Vision*, vol. 14, pp. 159–177, 1995.
- [14] T. Netter and N. Franceschini, "Neuromorphic optical flow sensing for nap-of-the-earth flight," in *Proc. of Conf. on Mobile Robots XIV*, D. W. Gage and H. M. Choset, Eds. Bellingham, U.S.A. : SPIE Vol. 3838, 1999, pp. 208–216.
- [15] M. Srinivasan, J. Chahl, K. Weber, S. Venkatesh, M. Nagle, and S. Zhang., "Robot navigation inspired by principles of insect vision," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26, pp. 203–216, 1999.
- [16] G. Barrows, C. Neely, and K. Miller, "Optic flow sensors for mav navigation," in *Fixed and flapping wing aerodynamics for Micro Air Vehicle applications*. Bellingham, U.S.A. : Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195, 2001, pp. 557–574.
- [17] M. Ichikawa, H. Yamada, and J. Takeuchi, "Flying robot with biologically inspired vision," *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 13, pp. 621–624, 2001.
- [18] T. Neuman and H. Bulthoff, "Insect inspired visual control of translatory flight," in *Proc. of the ECAL 2001*, Springer, Berlin, 2001, pp. 627–636.
- [19] T. Netter and N. Franceschini, "A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye," in *Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Lausanne, Switzerland : Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195, 2002, pp. 129–134.
- [20] F. Ruffier and N. Franceschini, "Octave, système de contrôle bio-inspire de l'altitude d'un micro-aéronef," in *Proceeding of Iere journées du Réseau Thématique Pluridisciplinaire (RTP) Micro-Robotique, Rennes (IRISA et ENS Cachan, antenne de Bretagne)*, G. Dumont, Ed. CNRS, 6 et 7 novembre 2002.
- [21] —, "Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air vehicles," in *Bioengineered and Bioinspired Systems*, A. Rodriguez-Vazquez, D. Abbott, R. Carmona, Eds. Bellingham, U.S.A : SPIE Vol. 5119, 2003, pp. 1–12.
- [22] J. Chahl, M. Srinivasan, and S. Zhang, "Landing strategies in honeybees and applications to uninhabited airborne vehicles," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 23(2), pp. 101–110, 2004.
- [23] S. Viollet and N. Franceschini, "A miniature biomimetic gaze control system," in *Proceeding of Int Conf on Robotics and Automation*. IEEE, 2004, pp. 504–510.
- [24] F. Ruffier and N. Franceschini, "Visually guided micro-aerial vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction," in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, New Orleans, USA, 2004, pp. 2339–2346.
- [25] W. Green, P. Oh, and G. Barrows, "Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot maneuvers in near-earth environments," in *Proceeding of IEEE International Conference of Robotics and Automation (ICRA 2004)*, New Orleans, USA, 2004, pp. 2347–2352.
- [26] F. Ruffier and N. Franceschini, "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 177–194, 2005.
- [27] L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J. Meyer, "A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 195–209, 2005.
- [28] J. Humbert and M. Frye, "Extracting behaviorally relevant retinal image motion cues via wide-field integration," in *Proc. of the American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, 2006.
- [29] J.-C. Zufferey and D. Floreano, "Fly-inspired visual steering of ultralight indoor aircraft," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22(1), pp. 137–146, 2006.
- [30] J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance," *Autonomous Robots*, vol. 25, pp. 103–122, 2008.
- [31] N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres, "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities," *Current Biology*, vol. 17(4), pp. 329–335, 2007.
- [32] J.-C. Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J.-D. Nicoud, and D. Floreano, "A 10-gram vision-based flying robot," *Advanced Robotics*, vol. 21(14), pp. 1671–1684, 2007.

- [33] F. Ruffier and N. Franceschini, "Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors," in *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nice, France.*, 2008.
- [34] F. Iida, "Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biologically inspired cheap vision," in *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (ISR)*, pp. 1404-1409, 2001.
- [35] W. Wu, L. Schenato, R. J. Wood, and R. Fearing, "Biomimetic sensor suite for flight control of a micromechanical flying insect : Design and experimental results," in *Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan*, 2003, pp. 1146-1151.
- [36] R. Wood, "The first takeoff of a biologically-inspired at-scale robotic insect," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 24(2), pp. 341-347, 2008.
- [37] J. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano, "Vision-based navigation from wheels to wings," in *Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE/RSJ, 2003, pp. 2968-2973.
- [38] S. Doncieux and J.-A. Meyer, *Applications of Evolutionary Computing*. Springer Verlag, 2003, ch. Evolving Neural Networks for the Control of a Lenticular Blimp, pp. 626-637.
- [39] M. A. Garratt and J. S. Chahl, "Vision-based terrain following for an unmanned rotorcraft," *Journal of Field Robotics*, vol. 25(4-5), pp. 284-301, 2008.
- [40] B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto, "A nonlinear terrain-following controller for a vtol unmanned aerial vehicle using translational optical flow," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09*, 2009.
- [41] A. Beyeler, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, "Vision-based control of near-obstacle flight," *Autonomous Robots*, vol. In Press, 2009.
- [42] D. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," in *In proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, (pp. 674-679), Vancouver, BC., 1981.
- [43] B. K. P. Horn and B. Schunck, "Determining optical flow," *Artificial Intelligence*, vol. 17, pp. 185-203, 1981.
- [44] C. Blanes, *Appareil visuel elementaire pour la navigation a vue d'un robot mobile autonome*. Marseille : Master thesis in Neurosciences (DEA in French), Neurosciences, Univ. Aix-Marseille II, 1986.
- [45] N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres, and S. Viollet, *Aerial vehicles*. In-Tech, 2009, ch. Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles, pp. 747-770.
- [46] M. Franz and H. Mallot, "Biomimetic robot navigation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, pp. 133-153, 2000.
- [47] G. DeSouza and A. Kak, "Vision for mobile robot navigation : a survey," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 24(2), pp. 237-267, 2002.
- [48] J.-M. Pichon, "Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 1ère partie," Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble), 1991.
- [49] N. Franceschini, J. M. Pichon, and B. C, "From insect vision to robot vision," *Philosophical Transaction : Biological Sciences*, vol. 337, pp. 283-294, 1992.
- [50] W. Kirchner and M. Srinivasan, "Freely moving honeybees use image motion to estimate distance," *Naturwissenschaften*, vol. 76, pp. 281-282, 1989.
- [51] M. Srinivasan, M. Lehrer, W. Kirchner, and S. Zhang, "Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees," *Visual Neuroscience*, vol. 6, pp. 519-535, 1991.
- [52] D. Coombs and K. Roberts, "Bee-bot : using peripheral optical flow to avoid obstacles," in *In SPIE : Vol. 1825. Intelligent robots and computer vision XI*, pp. 714-721, 1992.
- [53] A. Duchon and W. Warren, "Robot navigation from a gibsonian viewpoint," in *In proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (pp. 2272-2277), San Antonio, Texas, USA, 1994.
- [54] N. Ancona and T. Poggio, "Optical flow from 1d correlation : application to a simple time-to-crash detector," Memo no. 1375, AI Laboratory, MIT, Cambridge, MA, USA, Tech. Rep., 1993.
- [55] D. Murray, K. Bradshaw, P. Mclauchlan, I. Reid, and P. Sharkey, "Driving saccade to pursuit using image motion," *International Journal of Computer Vision*, vol. 16, pp. 205-228, 1995.
- [56] J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation : learning from bees," in *In proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 434-439, NY, USA., 1993.
- [57] K. Weber, S. Venkatesh, and M. Srinivasan, *From living eyes to seeing machines*. Oxford : Oxford University Press, 1997, ch. Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots, pp. 226-248.
- [58] A. Dev, B. Krose, and F. Groen, "Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow," in *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 558-563, Grenoble, France, 1997.
- [59] G. Baratoff, C. Toepfer, and H. Neumann, "Combined space-variant maps for optical flow navigation," *Biological Cybernetics*, vol. 83(3), pp. 199-209, 2000.
- [60] R. Carelli, C. Soria, O. Nasisi, and E. Freire, "Stable agv corridor navigation with fused vision-based controls signals," in *In proceedings the 28th IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON)*, vol. 3, pp. 2433-2438, Sevilla, Spain., 2002.
- [61] A. Argyros, D. Tsakiris, and C. Groyer, "Biomimetic centering behavior for mobile robots with panoramic sensors," *IEEE Robotics and Automation Magazine, Special issue on "Mobile robots with panoramic sensors"*, K. Daniilides and N. Papakolopoulos (Eds.), vol. 11, pp. 21-30, 2004.
- [62] S. Hrabar, G. Sukatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts, "Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a uav," in *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3309-3316, Edmonton, Alberta, Canada, 2005.

- [63] S. Kahlouche and K. Achour, "Optical flow based robot obstacle avoidance," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 4(1), pp. 13–16, 2007.
- [64] J. Humbert, H. Hyslop, and M. Chinn, "Experimental validation of wide-field integration methods for autonomous navigation," in *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2144-2149, San Diego, USA, 2007.
- [65] J. Humbert, R. Murray, and M. Dickinson, "Sensorimotor convergence in visual navigation and flight control systems," in *In proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*, 2005.
- [66] S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard, "Maximizing miniature aerial vehicles - obstacle and terrain avoidance for mavs," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, pp. 34–43, 2006.
- [67] S. Hrabar and G. Sukatme, "Optimum camera angle for optic flow-based centring response," in *In proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3922-3927, Beijing, China., 2006.
- [68] J.-C. Zufferey and D. Floreano, "Toward 30-gram Autonomous Indoor Aircraft : Vision-based Obstacle Avoidance and Altitude Control," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2005)*, 2005, sponsor : Swiss National Science Foundation. [Online]. Available : <http://www.icra2005.org/>
- [69] S. BermudezIBadia, P. Pyk, and P. Verschure, "A fly-locust based neuronal control system applied to unmanned aerial vehicle : the invertebrate neuronal principles for course stabilization, altitude control and collision avoidance," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 26(7), pp. 759–772, 2007.
- [70] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini, "Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles," in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Bangkok, Thailand, 2003, pp. Vol. III, pp. 846–849.
- [71] C. Blanes, "Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 2nde partie," Ph.D. dissertation, These de doctorat, Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble), 1991.
- [72] H. Heran and M. Lindauer, "Windkompensation und seitenwindkorrektur der bienen beim flug über wasser," *Z. vergl. Physiol*, vol. 47, pp. 39–55, 1963.
- [73] G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A 3d insect-inspired visual autopilot for corridor-following," in *Second IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pp. 19-26., 19-22 Octobre 2008, Scottsdale, Arizona, USA, 2008.