

# Navigation des drones par flux optique

Stéphane Doncieux et Adrien Angeli

5 juin 2006

## Chapitre 1

# Navigation des drones par flux optique

### 1.1. Introduction

De nos jours, les performances de l'électronique embarquée augmentent régulièrement, allant de pair avec une miniaturisation de plus en plus poussée. Il est, de ce fait, possible d'envisager en robotique l'utilisation de capteurs nécessitant un traitement complexe de l'information. Ainsi, alors que les télémètres lasers ou autres sonars et radars sont les capteurs les plus couramment adoptés dans ce domaine, l'utilisation de la vision semble être une alternative intéressante, en raison des applications multiples qu'elle laisse entrevoir, mais également par la simplicité des contrôleurs qui lui sont associés une fois les prétraitements nécessaires effectués.

En effet, même si une image en niveaux de gris ne nous fournit qu'une estimation bruitée de la quantité de lumière renvoyée par les objets présents dans la direction pointée par la caméra, les méthodes statistiques du traitement de l'image permettent d'en obtenir une information pertinente adaptée à la tâche souhaitée. La vision apporte une information riche qu'il faut savoir extraire et manipuler, en fonction des besoins, mais également des ressources disponibles. D'autre part, la mise en place d'un système de vision pour un robot autonome est simple à réaliser et les coûts engendrés sont largement inférieurs à ceux d'un télémètre laser, par exemple, compte tenu de la baisse des prix des caméras de taille réduite et de bonne qualité.

Les *capteurs à balayage* (sonars, radars et télémètres laser) constituent la majorité des dispositifs expérimentaux utilisés actuellement en robotique mobile, mais les premiers systèmes de navigation étaient basés sur la vision [MOR 77, MOR 80]. Au début des années 80, les capteurs à balayage étaient trop chers ou trop volumineux

#### 4 Navigation des drones par flux optique

pour être embarqués. La vision était donc privilégiée, malgré les fastidieux temps de calcul qu'elle nécessitait. Plus tard, la tendance s'est inversée, mais une partie des algorithmes de traitement d'image encore couramment utilisés (comme certaines méthodes d'extraction de points d'intérêt [LUC 81, HAR 88], de calcul du flux optique [HOR 81] ou bien de reconstruction de scène [LON 81]) datent de cette période.

La vision est par ailleurs largement utilisée dans le règne animal sous différentes formes. Certains insectes, comme les mouches, caractérisent leur environnement grâce au flux optique [SRI 91, SRI 96]; les rapaces, comme les faucons pèlerins ou les aigles, disposent de plusieurs fovea leur permettant de détecter leur proie à grande distance en vision monoculaire et de les localiser précisément pour la capture en vision binoculaire [WAL 42, MEY 77, TUC 00]. La Nature et des centaines de millions d'années d'évolution ont donc doté nombre d'êtres vivants de "capteurs optiques" divers, adaptés à leur niche écologique, et dédiés à assurer leur survie en leur permettant de naviguer dans leur environnement, de détecter leurs proies, leurs prédateurs ou leurs partenaires sexuels.

Les applications de la vision à la robotique sont nombreuses : des problèmes de localisation et de cartographie peuvent être adressés sur la base de la vision [DAV 02, JUN 04, SAE 06], de même que les tâches de navigation et d'évitement d'obstacles [MUR 03, MUR 05, ZUF 05a, ZUF 05b, HRA 06]. Les systèmes résultants sont généralement le fruit d'une association judicieuse entre inspiration du vivant et formalisme mathématique précis adapté au problème à résoudre.

Nous allons nous attacher ici à l'utilisation de la vision dans le cadre de la navigation des drones et dans le but d'assurer des fonctions de navigation bas-niveau. Nous verrons ainsi comment éviter des obstacles, réguler la vitesse et l'altitude d'un drone à partir de relations simples tirant partie des propriétés du flux optique.

Un *drone* ou *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle*) est un aéronef inhabité, piloté à distance, semi-autonome ou autonome, susceptible d'emporter différentes charges utiles, le rendant capable d'effectuer des tâches spécifiques, pendant une durée de vol pouvant varier en fonction de ses capacités<sup>1</sup>.

La notion *d'autonomie* comprend plusieurs sens. Nous nous intéresserons ici à l'autonomie *décisionnelle* du drone qui correspond à une indépendance, une fois en

---

1. définition provenant de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Drone>

vol, de toute intervention humaine. Les travaux que nous allons décrire, constituent la base de la partie réactive d'un système plus complet en cours d'étude, intégrant également des capacités de localisation, de cartographie et de planification de trajectoires, en exploitant les courants aériens pour économiser l'énergie consommée [DON 06]. Ce système a pour ambition d'atteindre une plus grande autonomie, en étant capable d'accomplir une mission, tout en gérant sa consommation énergétique.

Les informations sur l'état du drone et sur celui de son environnement lui sont données par ses capteurs et il agit sur son état et sur celui de son environnement par ses effecteurs. Dans notre approche "vision-centrée" nous utiliserons une caméra et une centrale inertielle en guise de capteurs, alors que les moteurs et les actionneurs commandant le drone en constitueront les effecteurs.

L'inspiration du vivant et le choix du flux optique pour la navigation ont été motivés par des travaux réalisés sur la mouche et l'abeille [SRI 91, FRA 92, SRI 96, BAR 02] mettant en évidence le rôle du flux optique dans la navigation de manière générale : les drones les plus avancés à ce jour ne peuvent rivaliser avec les performances de ces petits insectes, capables d'accélération importantes, de vol stationnaire, de changements de direction très rapides, de se poser la tête en bas, de détecter des mouvements infimes malgré une vitesse de déplacement élevée, le tout avec quelques centaines de milliers de neurones uniquement. Le mode de vision de la mouche, reposant sur le flux optique issu d'un capteur omnidirectionnel, a été utilisé en simulation pour mettre en œuvre des capacités de contrôle d'attitude, de stabilisation de trajectoire, d'évitement d'obstacles, de contrôle d'altitude et de suivi de terrain [NEU 02].

Nous allons montrer ici de quelle manière l'analyse du flux optique peut nous renseigner sur l'état de l'environnement et plus précisément sur les mouvements des objets présents dans cet environnement relativement à la position du drone. Nous verrons également comment faire pour utiliser l'information du flux optique dans le but de naviguer dans un environnement encombré en toute sécurité.

Nous commencerons ce chapitre par une présentation générale du flux optique. Dans la section suivante, nous en donnerons les différentes utilisations possibles en détaillant les étapes de l'analyse nécessaires à l'extraction d'une information exploitable pour la navigation et l'évitement d'obstacles. Enfin, avant de conclure, nous discuterons des limitations des contrôleurs basés sur ce principe.

## 1.2. Définition du flux optique

Les capteurs optiques, tels que la rétine humaine ou une simple caméra, peuvent être considérés comme des matrices constituées d'un ensemble de cellules, sur lesquelles viennent se projeter les photons émis par les objets soumis à l'éclairage d'une source lumineuse. Chaque cellule de cette matrice mesure alors la lumière renvoyée par une zone très précise de la scène visualisée et représente l'intensité lumineuse associée.

Lorsque la scène change, ou bien lorsque le capteur change de position, la projection de la scène sur la surface du capteur optique change également. Des bouleversements surviennent dans les intensités lumineuses enregistrées dans chacune des cellules. Toutefois, la projection de la scène apparaît toujours sur la surface du capteur. Les changements dans la répartition des intensités lumineuses sur la surface du capteur rendent compte des changements opérés réellement : le flux optique est une mesure des changements réels par leur projection sur la surface du capteur.

Le flux optique n'en est pas pour autant une mesure exacte des changements réels comme le précise [HOR 81]. Il s'agit de la perception par le système de vision des changements dans la scène. Cette perception peut être bruitée par des conditions d'éclairage variables, ou bien être totalement absente dans certains cas : comment déceler la rotation sur elle-même d'une sphère parfaitement lisse, de couleur uniforme et soumise à un éclairage régulier ?

Il faut alors faire la distinction entre le flux optique et la projection 2D théorique des changements observés dans la scène : le premier est simplement la perception du second par le système de vision. Le calcul du flux optique est donc fortement lié au capteur optique utilisé. Les multiples facettes des yeux globuleux de la mouche sont autant de détecteurs à la précision extrêmement fine qui lui permettent d'avoir une perception très fidèle des changements réels. Une simple suite d'images en niveaux de gris à la résolution assez basse, constitue le point d'entrée des algorithmes d'extraction de flux optique utilisés en informatique. Ils n'en donneront qu'une estimation bruitée.

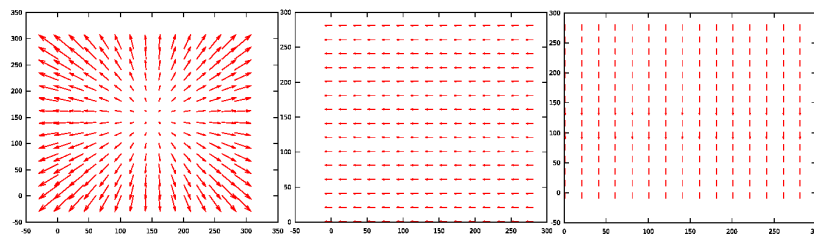
Plus concrètement, le calcul du flux optique dans une image permet d'associer à chacun de ses pixels un vecteur vitesse 2D représentant l'estimation de la vitesse correspondant à ce pixel. Par exemple, imaginons une scène simple avec une caméra disposée face à un mur très texturé. Lors du déplacement de la caméra vers la droite parallèlement à ce mur, les mouvements des pixels s'effectueront vers la gauche avec

une vitesse égale à la vitesse de la caméra. En effet, considérer que la caméra se déplace vers la droite, devant un mur immobile, est équivalent à considérer que c'est le mur qui se déplace vers la gauche, alors que la caméra est immobile. Le flux optique donne donc, dans ce cas, des vecteurs vitesse de direction horizontale, orientés vers la gauche et de norme égale à la norme de la vitesse de la caméra.

Ce petit exemple montre qu'il existe un lien entre le déplacement de la caméra et la perception de l'environnement qu'il engendre. Par exemple, à partir de l'estimation du flux optique, il est possible de déduire la vitesse de la caméra et la direction de son mouvement. Remarquons, cependant, que cela n'est possible que dans le cas d'un environnement statique. Dans le cas contraire, nous serions ici incapables de faire la distinction, dans le flux optique observé, entre la part due au mouvement de la caméra et celle due aux mouvements des objets.

Imaginons un autre petit exemple, dans lequel nous disposons une caméra face à deux murs texturés situés à la même distance de la caméra, mais séparés par un espace vide. Lors d'un mouvement de translation de la caméra dans la direction des murs, un flux optique dit "radial", associé à chaque mur, peut être observé, mais rien au centre. Dans ce second exemple, il est possible de caractériser la présence d'un obstacle par la présence d'un flux optique.

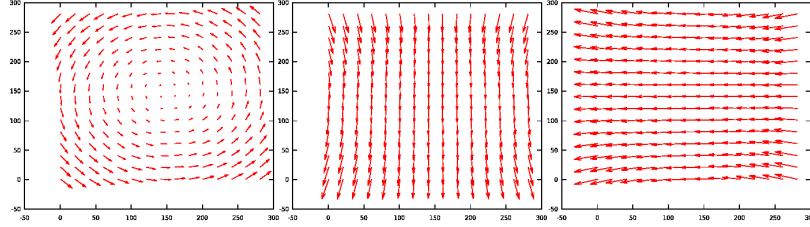
Les figures 1.1 et 1.2 donnent des exemples de flux optique. Dans la première, il s'agit du flux optique obtenu dans le cas de translations selon les axes  $(X, Y, Z)$  (voir la figure 1.3 pour les notations). Dans la seconde, il s'agit du flux optique obtenu dans le cas de rotations selon ces mêmes axes.



**Figure 1.1.** Exemples de flux optique dans le cas de mouvements de translation. De gauche à droite, les translations sont effectuées selon les axes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ .

Il existe principalement trois grandes familles de méthodes pour le calcul du flux optique :

## 8 Navigation des drones par flux optique



**Figure 1.2.** Exemples de flux optique dans le cas de mouvements de rotation. De gauche à droite, les rotations sont effectuées selon les axes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ .

- les méthodes différentielles
- les méthodes de corrélation
- les méthodes fréquentielles

Mathématiquement et sous certaines hypothèses, les deux premières méthodes correspondent à la même forme d'estimation [SIM 93] mais elles diffèrent par leur mise en oeuvre algorithmique et possèdent chacune leurs particularités. La dernière famille de méthode vient directement de la théorie sur le traitement du signal. Elle est plus marginale et moins utilisée en raison de la complexité des traitements nécessaires. Pour plus de détails et une étude comparative voir [SIM 93], [BEA 95] et [BAR 94].

Dans la suite de ce chapitre, nous allons illustrer notre propos par les travaux relatés dans [MUR 05], dont les algorithmes de calcul du flux optique sont basés sur les méthodes de corrélation. Nous allons donc détailler ici le principe de ce type de méthode.

L'idée consiste à estimer le déplacement  $d$  séparant deux imageries de taille  $n \times n$  prises dans deux images consécutives de façon à minimiser les différences entre les imageries. Ainsi, en désignant par  $I(y, x, t)$  l'intensité lumineuse à la position  $(y, x)$  dans l'image à l'instant  $t$ , nous cherchons la valeur de  $d$  qui permet de minimiser la somme des différences au carré entre les deux imageries :

$$E(d) = \sum_{i=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} w_{ij} [I(y+i, x+j, t) - I(y+d_y+i, x+d_x+j, t+1)]^2$$

avec  $d = (d_y, d_x)^T$  et  $w_{ij}$  un ensemble de poids positifs pondérant la contribution de chaque pixel de l'imagerie de manière à accorder une importance dégressive en fonction de l'éloignement du centre de l'imagerie. La division de la valeur de  $d$  ainsi

obtenue par le  $\delta t$  séparant les deux images prises en compte dans l'estimation, nous donne la vitesse instantanée et donc le flux optique instantané associé au centre de l'imagette considérée.

Les méthodes de corrélation sont généralement assez coûteuses en temps de calcul en raison des comparaisons entre imagettes : il faut définir une zone de recherche autour de l'imagette de départ dans laquelle on fait toute une série de comparaisons avec des imagettes candidates. Cette étape de l'estimation peut s'avérer fastidieuse surtout si l'image est grande. Certains algorithmes remplacent cette recherche dans l'espace par une recherche dans le temps, réduisant considérablement la zone de recherche sous l'hypothèse d'un faible déplacement entre deux images consécutives [CAM 97]. Cela est particulièrement intéressant dans le cas où le nombre d'images disponibles par seconde est élevé, réduisant de fait les déplacements possibles d'une image à l'autre.

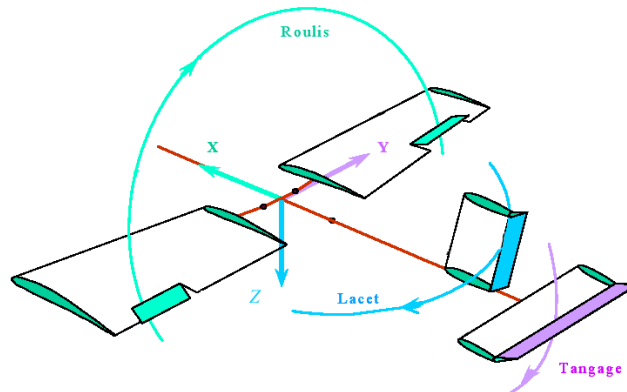
Il existe également pour cette famille d'algorithmes une multitude de méthodes partageant les mêmes bases théoriques mais aux implémentations différentes. C'est par exemple le cas de [SIN 92] dont le processus de comparaison des imagettes est précédé d'une étape de pré-filtrage spatio-temporel et suivi d'une mesure de confiance dans un cadre probabiliste.

### 1.3. Navigation reposant sur le flux optique

Nous avons vu dans la section 1.2 que le flux optique calculé dans une suite d'images, nous donnait une information de vitesse associée à chaque pixel. Dans le but d'accomplir la tâche d'évitement d'obstacles, il nous faut définir un processus permettant d'obtenir, à partir de ces vecteurs vitesse, une information pertinente pour éviter les collisions.

Tout d'abord, il est important de rappeler le cadre général de notre étude. Nous nous plaçons dans la situation d'un drone évoluant librement dans un environnement en trois dimensions, selon trois degrés de liberté (figure 1.3) : nous supposons que le drone peut effectuer des translations selon l'axe  $X$  (pour avancer) ainsi que des rotations selon les axes  $Z$  (pour le changement de cap) et  $Y$  (pour le changement d'altitude). Cette hypothèse n'est pas restrictive, les drones à voilure fixe comme à voilure tournante disposant de ces degrés de liberté. Nous équipons ce drone d'un capteur optique, une simple caméra, de manière à pouvoir analyser le flux optique engendré par son propre mouvement. Pour des raisons que nous précisons plus loin, nous dotons également ce drone d'une centrale inertielle, pour disposer, à chaque instant, des différentes vitesses instantanées de rotation.





**Figure 1.3.** Les axes du drones et les définitions des rotations.

La première contrainte forte que nous imposons est de considérer que l’environnement du drone est statique, c’est-à-dire que les objets ne se déplacent pas. La prise en compte et la gestion d’objets dynamiques marquent une rupture avec la théorie développée ci-après, en ce qui concerne l’estimation de la distance aux objets, par le biais du *temps avant impact*. Nous verrons plus loin pourquoi la détermination du temps avant impact ne permet pas, dans le cadre théorique employé ici, de prendre en compte des objets qui se déplacent.

Par ailleurs, en raison de l’utilisation de la vision, nous faisons l’hypothèse d’une luminosité suffisante en imposant un éclairage (artificiel ou naturel) permettant de distinguer clairement tous les obstacles. Il faut également veiller à ne pas produire de reflets pouvant “éblouir” totalement la caméra et éviter toute variation brutale de la luminosité qui serait interprétée par le système comme un mouvement dans l’image. Ces deux contraintes sont fortement liées à la qualité du capteur employé. Avec un capteur de bonne qualité et un éclairage régulier, ces conditions seront aisément remplies. Néanmoins, elles constitueront un point à considérer avec soin pour une utilisation continue en environnement réel.

Nous allons maintenant détailler la chaîne des traitements qui permettra d’obtenir une information utile pour la tâche souhaitée.

### 1.3.1. Flux optique “utile”

Sous l’hypothèse d’un environnement statique, la présence d’un flux optique non nul ne peut être due qu’au déplacement du drone. En effet, sans déplacement du drone, la caméra reste immobile et filme donc toujours la même scène, exactement dans les mêmes conditions, puisque les objets eux-mêmes sont immobiles. Le flux optique à l’arrêt est de ce fait nul.

Chaque mouvement du drone entraînera l’apparition d’un flux optique. Mais quelle information nous apporte ce flux optique sur la présence d’obstacles dans l’environnement ? Dans le cas d’un mouvement de translation rectiligne dans la direction pointée par la caméra, le flux optique sera plus important pour les objets proches que pour les objets éloignés. Une estimation relative de la position des obstacles peut donc être déduite de la grandeur du flux optique. La présence d’un flux optique important dans une zone de l’image, indique donc qu’il est prudent de tourner pour s’éloigner de cette zone.

Mais qu’en est-il dans le cas d’une rotation du drone sur lui-même ? Ce mouvement engendre lui aussi l’apparition d’un flux optique. Mais ce dernier ne nous permet pas de déterminer la présence d’un danger immédiat : l’information qu’il nous apporte n’est pas pertinente pour l’évitement d’obstacles, puisque nous ne pouvons plus en déduire la distance relative aux objets (le flux optique dû à un mouvement de rotation de la caméra sur elle-même est indépendant de la distance aux objets). Il serait donc dangereux, dans ce cas, de prendre une décision basée sur l’analyse du flux optique : le drone serait contraint de changer de position, alors qu’il ne risquait rien. Les travaux de [SCH 99] montrent que le comportement des abeilles en vol vise à minimiser les rotations et à effectuer un maximum de translations vers l’avant. En alternant petites rotations rapides (“saccades”) et longues translations vers l’avant, les abeilles maximisent le temps pendant lequel le flux optique est pertinent pour l’évitement d’obstacles.

Que se passe-t-il enfin lorsque le drone amorce une procédure de virage ? Il s’agit là d’une composition d’une rotation sur lui-même et d’une translation rectiligne. Le flux optique observé contiendra alors une information pertinente (celle due au mouvement de translation) et une autre inutile (celle due au mouvement de rotation).

Nous voyons donc qu’il est indispensable de pouvoir faire le tri dans les informations disponibles ([LAN 04]). C’est pour cela que nous allons utiliser une centrale inertielle : celle-ci nous donne, en effet, les vitesses angulaires instantanées de rotation du drone sur lui-même. Connaissant ces vitesses de rotation, il est alors possible

de soustraire au flux optique calculé numériquement, les composantes du flux optique dûes aux rotations. Il suffit pour cela d'exprimer la projection théorique 2D du mouvement d'un objet dû au mouvement de rotation de la caméra dans l'environnement.

La projection du mouvement de  $\vec{P} = (P_X, P_Y, P_Z)^T$  dans le plan image de la caméra donne lieu à la vitesse  $\vec{v}_r$  de  $\vec{r} = (y, x)^T$  sur la surface du capteur optique selon l'équation suivante :

$$\vec{v}_r = f \begin{pmatrix} \frac{-V_Y + yV_X}{P_X} + \Omega_Y xy - \Omega_Z(1 + y^2) + \Omega_X x \\ \frac{-V_Z + xV_X}{P_X} + \Omega_Y(1 + x^2) - \Omega_Z(xy) - \Omega_X y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_y \\ v_x \end{pmatrix} \quad [1.1]$$

avec  $f$  la focale de la caméra,  $\vec{V} = (V_X, V_Y, V_Z)^T$  le vecteur des vitesses de translation et  $\vec{\Omega} = (\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z)^T$  le vecteur des vitesses de rotation.

Il est alors possible de décomposer l'équation 1.1 en deux parties :

$$\vec{v}_r^{trans} = f \begin{pmatrix} \frac{-V_Y + yV_X}{P_X} \\ \frac{-V_Z + xV_X}{P_X} \end{pmatrix}$$

la composante de translation du flux optique et

$$\vec{v}_r^{rot} = f \begin{pmatrix} \Omega_Y xy - \Omega_Z(1 + y^2) + \Omega_X x \\ \Omega_Y(1 + x^2) - \Omega_Z(xy) - \Omega_X y \end{pmatrix}$$

la composante de rotation du flux optique. Connaissant  $x$ ,  $y$  et  $\Omega_{\{X,Y,Z\}}$ , il est possible de calculer  $\vec{v}_r^{rot}$  et de le soustraire au flux optique global obtenu à partir des images.  $\vec{v}_r^{trans}$ , la composante utile à l'évitement d'obstacles, est ainsi obtenu à partir du flux optique global.

### 1.3.2. Évitement des obstacles latéraux

Une fois l'information épurée de toutes les composantes de rotation inexploitable dans notre contexte, nous devons définir une politique permettant d'éviter les obstacles présents dans le champ de vision de la caméra. Les travaux de Franceschini [FRA 92] et Srinivasan [SRI 91] et [SRI 96] montrent que les abeilles arrivent à se maintenir à égale distance des obstacles latéraux, en égalisant le flux optique qu'elles perçoivent grâce à leurs ocelles. Imaginons une abeille évoluant dans un couloir dont les murs sont texturés. Si l'abeille se trouve plus près du mur gauche, le flux optique perçu par son oeil gauche sera plus important que celui perçu par son oeil droit. En s'écartant du mur gauche, le flux optique de gauche va diminuer alors que celui de droite va augmenter. Lorsqu'ils seront égaux, l'abeille sera au centre du couloir.

Cette capacité peut se mettre en évidence très simplement à partir de la relation suivante [MUR 05] :

$$\frac{h}{f} = \frac{Y}{X} \quad [1.2]$$

$h$  étant la distance séparant la projection sur le capteur visuel de l'objet du centre du capteur visuel,  $f$  la focale de la caméra et  $(X, Y)$  étant les coordonnées de l'objet dans le repère constitué par les axes longitudinaux et latéraux du drone (figure 1.4).

En supposant qu'il n'y a pas de dérapage, autrement dit que  $Y$  est constant au cours du temps, le mouvement horizontal  $M_h$  d'un objet tel que perçu par un capteur visuel, peut se calculer de la façon suivante :

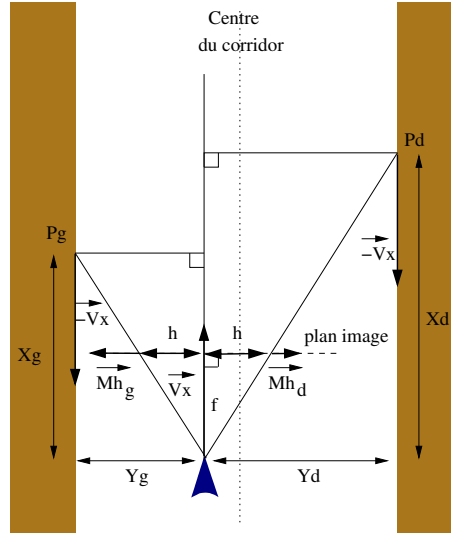
$$\dot{h} = M_h = -\frac{fY\dot{X}}{X^2} \quad [1.3]$$

Ce qui, en remplaçant  $\frac{fY}{X}$  par  $h$  (éq. 1.2) et  $\dot{X}$  par  $-V_x$ ,  $V_x$  étant la vitesse du drone, devient :

$$M_h = \frac{h \times V_x}{X} \quad [1.4]$$

Dans le cas d'une navigation dans un corridor, équilibrer  $M_{h_d}$  et  $M_{h_g}$  aura comme conséquence d'équilibrer  $X_d$  et  $X_g$ , étant donné que  $V_{x_d}$  et  $V_{x_g}$  sont égaux<sup>2</sup> (figure

2. L'environnement étant supposé statique, les  $V_x^i$  valent tous l'opposé de la vitesse du drone.



**Figure 1.4.** *Prise en compte des points  $P_g$  et  $P_d$  se projetant à une même distance  $h$  sur le capteur visuel. L'environnement étant supposé statique, leur mouvement relatif est de  $-V_x$ .  $X_g$  étant inférieure à  $X_d$ ,  $Mh_g$  est donc supérieur à  $Mh_d$ .*

1.4). L'équilibrage de  $X_d$  et  $X_g$  aura pour conséquence de centrer le drone dans le corridor.

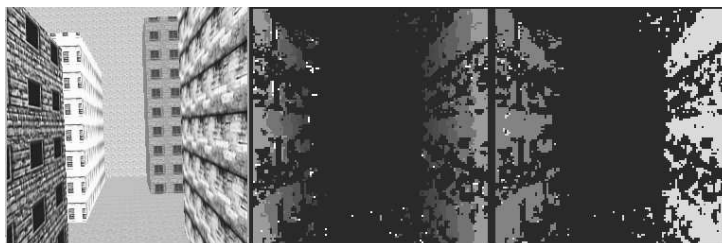
En pratique, l'équilibrage peut s'obtenir à partir d'une simple correction proportionnelle de la valeur de consigne du lacet, noté  $\Psi^{cible3}$  :

$$\Delta \Psi^{cible} = k_{\Psi} \times (\overline{M_{h_d}} - \overline{M_{h_g}}) \quad [1.5]$$

où  $\overline{M_{h_d}}$  et  $\overline{M_{h_g}}$  sont respectivement les mouvements horizontaux moyens des pixels sur la partie droite et sur la partie gauche du drone.

Cette approche a été mise en place et testée sur une simulation réaliste d'hélicoptère. Dans ces expériences, une caméra est dirigée vers l'avant. Les images qui en sont issues, sont coupées en deux verticalement et les mouvements horizontaux de ces deux zones sont utilisés pour la loi de commande de consigne de lacet [MUR 03, MUR 05].

3. Le lacet doit ensuite être maintenu avec un contrôleur de bas niveau dépendant de la plateforme employée.



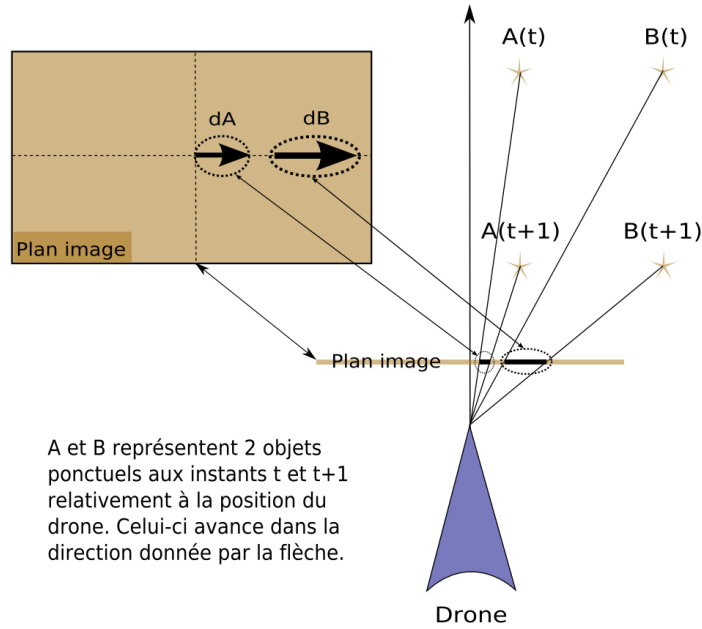
**Figure 1.5.** *Vue de l'environnement simulé utilisé dans [MUR 05]. À gauche : image issue d'un moteur graphique. Au centre amplitude des mouvements calculés (blanc : mouvement rapide, noir : pas de mouvement). À droite : direction des mouvements détectés (gris-clair : mouvement vers la droite, gris foncé : mouvement vers la gauche). L'image est coupée en deux et la différence entre les mouvements horizontaux moyens à gauche et à droite pilote le lacet du drone.*

Dans un autre dispositif, deux caméras sont disposées à l'avant du drone et séparées par un angle de  $45^\circ$ . Une loi de commande est alors définie pour maintenir égales les moyennes des flux optiques donnés par chacune des caméras. Un tel dispositif expérimental a été mis en place sur un hélicoptère [HRA 06]. Les résultats expérimentaux obtenus prouvent la viabilité de l'approche : l'hélicoptère reste au centre d'un "canyon urbain" tout en maintenant une vitesse raisonnable. Cette approche a été comparée à un système basé sur une caméra panoramique et les résultats étaient équivalents en moyenne.

### 1.3.3. Évitement des obstacles frontaux

La stratégie proposée précédemment permet de s'accommoder des obstacles latéraux en équilibrant leurs distances relatives. Elle ne permet pas, par contre, de gérer la présence d'obstacles frontaux. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une information sur la distance aux objets relativement à la position du drone.

Sous l'hypothèse d'un environnement statique, les objets proches ont un flux optique plus important que les objets lointains. Par ailleurs, les objets, dont la projection dans le plan image de la caméra est éloignée du centre de l'image (autrement dit les objets qui se situent sur le côté), ont un flux optique plus important que ceux se situant au centre : si deux obstacles appartiennent à un même plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra et situé à une distance  $P_X$  du drone, l'objet positionné sur le côté de l'image aura un flux optique plus grand que celui positionné au centre (figure 1.6).



**Figure 1.6.** Flux optique : un objet B sur le côté de l'image produira un flux optique dB plus important qu'un objet A situé dans le centre de l'image et produisant un flux optique dA.

Cette constatation vient de la nature du flux optique perçu comme une projection sur le capteur optique 2D du mouvement réel dans l'espace : lorsque le drone s'approche d'un obstacle, la perception de la translation selon l'axe optique de la caméra, est transformée en translation dans le plan image de la caméra. Pour donner la même importance à deux obstacles situés à la même distance du drone, mais dont les distances par rapport au centre de l'image sont différentes, il faut normaliser le flux optique : le temps avant impact (TaI) est une estimation, en chaque pixel de l'image, du temps au bout duquel le drone va entrer en collision avec un obstacle, s'il garde sa vitesse constante. La mise en équation présentée par la suite est inspirée du travail de [GAL 05].

Sachant que

$$\vec{r} = \frac{f}{P_X} \vec{P} = \frac{f}{P_X} \begin{pmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \\ f \frac{P_Y}{P_X} \\ f \frac{P_Z}{P_X} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \\ y \\ x \end{pmatrix} \quad [1.6]$$

avec  $\vec{r}$  exprimé sous sa forme augmentée, la norme (2D)  $r$  de  $\vec{r}$  relativement à  $P$ , se déduit comme suit :

$$r = \sqrt{y^2 + x^2} = \frac{f}{P_X} \sqrt{P_Y^2 + P_Z^2} \quad [1.7]$$

La dérivation de l'équation 1.7 par rapport au temps nous donne :

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r}{P_X} \frac{dP_X}{dt} \quad [1.8]$$

Pour la dérivation, les quantités qui varient au cours du temps, sont  $P_X$  et  $r$ . La focale  $f$  est un paramètre intrinsèque de la caméra et reste donc constante. La distance  $\sqrt{P_Y^2 + P_Z^2}$  reste également constante : il s'agit de la distance dans le plan formé par  $P_Y$  et  $P_Z$  qui sépare  $P$  de l'axe optique. L'hypothèse d'un environnement statique interdit tout mouvement de l'objet et, puisque l'on considère que les composantes de rotation du flux optique ont été supprimées, tous les mouvements de rotation de la caméra ont disparu : il ne reste que le flux optique de translation. Nous pouvons alors considérer que la caméra a effectué un mouvement de translation rectiligne dans la direction de l'axe optique, validant le fait que la distance  $\sqrt{P_Y^2 + P_Z^2}$  soit fixe au cours du temps.

L'équation 1.8 nous donne la relation entre la vitesse d'un point dans l'espace et sa projection dans le plan image. Nous savons par ailleurs qu'en raison du mouvement de translation rectiligne de la caméra (après annulation des composantes de rotation), la vitesse du point  $P$  relativement au drone, est donnée par  $dP_X/dt$ . Le temps avant impact est alors donné par :

$$TaI = \frac{P_X}{dP_X/dt} \quad [1.9]$$

Nous pouvons alors écrire par équivalence l'équation 1.9 sous la forme suivante :

$$\frac{P_X}{dP_X/dt} = -\frac{r}{dr/dt} = TaI \quad [1.10]$$

Nous pouvons donc estimer l' $TaI$  en chaque pixel de l'image en divisant la vitesse de chacun des pixels par la distance les séparant du centre de l'image. Le signe “-” de

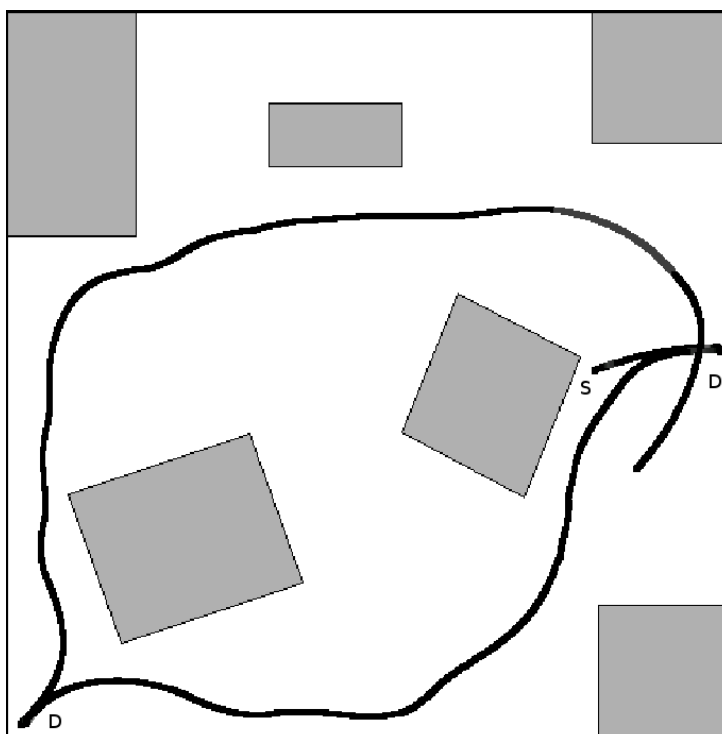


l'équation 1.10 reflète bien la notion de relativité entre la vitesse du drone et la vitesse d'un obstacle : considérer que le drone avance vers l'objet statique revient à dire que l'objet avance dans le sens opposé vers le drone.

Le calcul de l'ITaI nous apporte une métrique permettant de caractériser de manière quasi-absolue la présence d'un obstacle dans l'environnement perçu par la caméra. Nous sortons effectivement du cadre plus relatif de l'information apportée par la norme du flux optique qui nous permet de simplement quantifier la distance à un objet relativement aux autres. Il faut cependant remarquer que l'ITaI n'est pas une métrique totalement absolue, car son estimation est faite à chaque instant, relativement à la position du drone à cet instant : pour une position du drone donnée, une valeur élevée de l'ITaI correspond à un obstacle proche, alors qu'une valeur faible correspond à un obstacle éloigné. Lorsqu'un objet s'approche continuellement du drone, l'ITaI augmente progressivement jusqu'à tendre vers l'infini.

En définissant un seuil sur la valeur du temps avant impact en deçà duquel les obstacles frontaux sont considérés comme trop proches, une procédure de demi-tour peut être amorcée, par exemple. C'est la stratégie adoptée dans [MUR 03] et [MUR 05] : en calculant le temps avant impact moyen sur la totalité de l'image, un demi-tour est déclenché lorsque celui-ci est trop faible, en appliquant une procédure prédéterminée. Le contrôleur implémentant cette procédure peut être associé à celui précédemment décrit pour l'évitement des obstacles latéraux, en adoptant une architecture dite de *subsumption* [BRO 86], dans laquelle le réflexe de demi-tour a une priorité plus importante que le contrôleur responsable de l'évitement des obstacles latéraux. Pendant le demi-tour, l'équilibrage du flux optique est inhibé. Il ne redevient actif qu'à la fin de cette procédure. Ce dispositif permet de gérer les obstacles frontaux, ainsi que les angles dans lesquels la stratégie d'équilibrage entraîne le drone (figure 1.7).

Un autre type d'approche est donnée dans les travaux de [ZUF 05a] et [ZUF 05b]. Le calcul du flux optique dans les images est ici remplacé par l'utilisation de capteurs de flux optique 1D placés à différents endroits sur un robot mobile. Ces capteurs calculent le flux optique 1D associé à la petite zone de l'espace qu'ils couvrent. En multipliant ce genre de capteurs à différents endroits, la réponse du flux optique associée à différentes zones de l'environnement est obtenue. L'ensemble de ces réponses est ensuite utilisé pour prendre une décision. C'est équivalent à calculer le flux optique dans toute l'image d'une caméra, mais à ne retenir que certains pixels de l'image pour prendre une décision. Cette stratégie simple est efficace dans le cas d'environnement à la complexité réduite, avec, par exemple, des parois régulières aux textures répétitives facilement détectables par les capteurs de flux optique. Dans le cas d'un environnement plus complexe, des objets de petites tailles peuvent cependant passer inaperçus.



**Figure 1.7.** Trajectoire suivie par un hélicoptère simulé vue de dessus. Le point de départ est indiqué par un 'S'. Le contrôleur utilisé contient la stratégie d'équilibrage ainsi que le réflexe de demi-tour. Les zones marquées 'D' correspondent aux zones dans lesquelles le drone a fait demi-tour. La première correspond au cas d'une obstacle frontal et la seconde à un angle.

#### 1.3.4. Adaptation de la vitesse du drone

Le temps avant impact renseigne sur la distance relative des obstacles pendant une translation longitudinale. En moyennant cette information sur toute l'image, la présence d'un obstacle frontal peut être détectée. Cette stratégie permet de déclencher un réflexe de demi-tour, comme nous l'avons évoqué précédemment. Cette information du temps avant impact "moyen" peut cependant être utilisée à d'autres fins : elle peut servir à adapter la vitesse d'un drone à l'encombrement de l'environnement.

Deux raisons nous poussent à chercher une telle capacité. La plus importante et la plus évidente, est d'assurer la sécurité du drone. Dans un environnement très encombré, le drone volera de préférence lentement, afin de disposer de suffisamment de temps pour naviguer entre les obstacles et avoir, notamment, le temps et la place

nécessaires pour amorcer des virages. Par contre, dans un environnement ouvert, où il n'y aura aucun risque, il sera intéressant de permettre des vitesses de vol plus rapides.

La seconde raison porte sur le fonctionnement même des algorithmes de calcul du flux optique. Quel que soit l'algorithme choisi, l'intervalle des mouvements détectés sera nécessairement limité. Pour un algorithme de type corrélation, tel que celui utilisé dans [MUR 05], l'intervalle des valeurs détectées va de  $\frac{4}{10}$ ème de pixels à 4 pixels. Le contrôleur de vitesse du drone doit donc également adapter sa vitesse pour que les mouvements restent dans cet intervalle de valeurs.

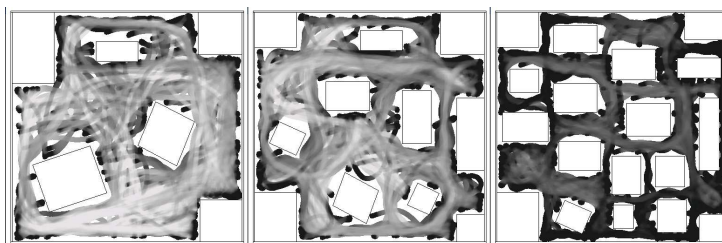
La loi suivante, définie dans [MUR 05], permet de réaliser simplement cette adaptation de vitesse :

$$\delta(V_x^{cible}) = kV_x(\eta^{cible} - \eta)$$

où  $V_x^{cible}$  est la vitesse utilisée comme consigne pour le contrôleur responsable de cette variable ;  $V_x$  est la vitesse courante et  $k$  une constante prédéterminée ;  $\eta$  est la moyenne sur l'image de l'inverse du temps avant impact et  $\eta^{cible}$  est une valeur cible à déterminer en fonction de la plateforme utilisée et de la plage de mouvements détectés par l'algorithme de calcul de flux optique.



**Figure 1.8.** Exemples de trajectoires dans les trois environnements de densité d'obstacles variable. Le point de départ est indiqué par un 'S'. Le niveau de gris indique la vitesse du drone : gris foncé pour une vitesse lente et gris clair pour une vitesse rapide. Lorsque le drone est dans une zone dégagée, il accélère. Dans une zone encombrée, ou lorsqu'il est proche d'un obstacle, il ralentit et se maintient à une vitesse lente.



**Figure 1.9.** Vitesses moyennes en chaque point sur 100 expériences dans les trois différents environnements. Les points gris clair indiquent des vitesses élevées, les points gris sombre indiquent des vitesses faibles.

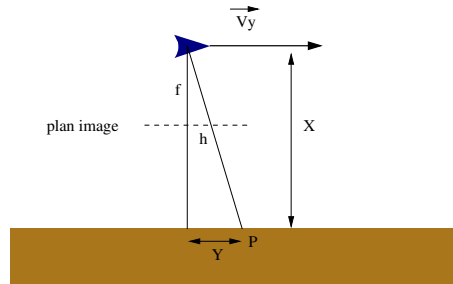
La stratégie associant équilibrage des flux gauches et droits pour l'évitement des obstacles latéraux, réflexe de demi-tour pour les obstacles frontaux et adaptation de la vitesse, a été validée dans trois environnements de densité d'obstacles différentes (figure 1.8). Dans l'environnement contenant de nombreux obstacles, le drone reste à une vitesse constante basse :  $0.73 \text{ m.s}^{-1}$  avec un écart-type de  $0.2 \text{ m.s}^{-1}$ . Dans un environnement contenant peu d'obstacles, l'adaptation effective de la vitesse a pu être observée. La vitesse moyenne est plus importante :  $1.06 \text{ m.s}^{-1}$  et l'écart-type est également plus important :  $0.30 \text{ m.s}^{-1}$ . L'observation de trajectoires individuelles (figure 1.8) ou du comportement moyen au voisinage des obstacles (figure 1.9) permet également de constater cette adaptation.

Les vitesses effectives des pixels sont également bien restées dans la plage de sensibilité de l'algorithme utilisé, ce qui a permis d'atteindre un taux de réussite de 100%, correspondant à des trajectoires sans aucune collision dans les trois environnements sur 100 expériences de 5 minutes par environnement. La robustesse au bruit sur les capteurs a été mise en évidence par des tests avec des bruits d'écart-type croissant. Les performances ne commencent à chuter qu'à partir de bruits de relativement grand écart-type :  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  pour les vitesses de translation,  $0,5 \text{ m}$  pour l'altitude et  $2 \text{ deg}$  pour le roulis, le tangage et le lacet de la plateforme.

### 1.3.5. Contrôle de l'altitude

Dans les expériences présentées jusqu'à présent, les capteurs visuels utilisés étaient pointés dans le sens du mouvement du drone. Cependant, s'ils sont pointés vers le bas, de nouvelles possibilités se présentent : le flux optique peut être utilisé pour réguler le rapport entre altitude et vitesse d'avancement [RUF 03]. En effet, comme précédemment, nous pouvons partir de l'équation 1.2, mais en supposant que  $X$ , autrement dit l'altitude, est constante, nous pouvons en déduire la relation suivante (figure 1.10) :

$$\dot{h} = M_h = \frac{f.V_y}{X} \quad [1.11]$$



**Figure 1.10.** Dispositif permettant de réguler le rapport vitesse/altitude. Les notations sont les mêmes que précédemment de façon à conserver la cohérence dans les équations présentées dans le texte.

autrement dit, les mouvements détectés sont proportionnels au rapport entre la vitesse de translation et l'altitude. À vitesse donnée, le flux optique peut être utilisé pour réguler l'altitude : à vitesse faible, le drone volera près du sol et à vitesse importante, il volera plus loin du sol. Ce système peut également être utilisé pour un atterrissage sûr à vitesse nulle : plus la vitesse du drone diminue, plus le drone s'approche du sol jusqu'à le toucher à vitesse nulle. C'est cette stratégie, reproduite par les auteurs de [OH 04], qui est utilisée par les abeilles [CHA 04]. Elle sera présentée, en détails, dans un autre chapitre de ce livre.

#### 1.4. Discussion

L'utilisation de la vision sur un drone, et en particulier un mini-drone, est très intéressante, compte tenu de la polyvalence de ce type de capteur. Il peut être utilisé, aussi bien pour permettre au drone de naviguer de façon autonome en évitant des obstacles et en régulant sa vitesse et son altitude en fonction de son environnement, que pour fournir un retour exploitable par un opérateur au sol.

Le développement des téléphones portables permet de disposer aujourd'hui de capteurs visuels pesant 1/2 gramme, ce qui les rend très attractifs pour des mini, voire des micro-drones. Cependant, la qualité du capteur et de son éventuelle optique est un paramètre crucial qui ne doit pas être négligé. De leur qualité dépendra pour beaucoup les capacités finales du système. Si les textures des obstacles ne sont pas vues, l'algorithme de calcul de flux optique ne pourra rien faire : le drone ne verra tout simplement pas l'obstacle et risque donc de le percuter. Ce cas de figure peut également se produire en cas d'éclairage trop faible ou trop fort. Si le capteur visuel ne dispose pas d'un mécanisme d'adaptation de la luminosité suffisant, les obstacles ne seront tout simplement pas vus. Pire même, une vaste surface dont la texture ne serait pas perçue, risque d'"attirer" le drone, étant donné qu'aucun mouvement n'y sera détecté : le

contrôleur identifiera cette zone comme étant sûre pour le drone et l'entraînera dans cette direction...

Les algorithmes de calcul du flux optique imposent des limites sur les mouvements minimum et maximum qui peuvent être détectés. Cette contrainte impose, en conséquence, une limitation de la vitesse maximale du drone, en fonction des caractéristiques de son environnement. Nous avons vu un mécanisme de contrôle simple permettant de s'assurer que le drone reste dans cette zone de viabilité. Néanmoins, les vitesses maximales autorisées peuvent être insuffisantes pour une application donnée. Dans ce cas, il n'y a pas d'autre choix que de changer la fréquence du capteur visuel. En augmentant le nombre d'images par seconde, en supposant que le capteur et l'électronique chargée du calcul du flux optique puisse suivre, il sera possible de voler plus vite. Outre les capacités de l'électronique embarquée, la contrainte portant sur les mouvements minimaux détectables impose cependant de trouver un compromis.

La simplicité des contrôleurs présentés dans ce chapitre, ne doit cependant pas faire oublier une étape importante et très coûteuse en temps de calcul : le calcul du flux optique. Les différents algorithmes rapidement évoqués au début du chapitre nécessitent une importante puissance de calcul embarquée, voire des composants dédiés, afin de pouvoir fonctionner en temps réel. Une alternative consiste à ne pas utiliser une caméra standard, mais des capteurs dédiés donnant directement une information sur les mouvements perçus visuellement [FRA 86, BAR 00, HAR 00]. Ces capteurs, basés sur les détecteurs élémentaires de mouvement observés chez les insectes [HAS 56], permettent de s'affranchir du coûteux calcul du flux optique. Néanmoins, pour atteindre une résolution équivalente à celle utilisée dans les expériences décrites ici, à savoir 256x256, de nombreux capteurs élémentaires de ce type doivent être utilisés. En effet, ils ne sont sensibles qu'aux mouvements d'une zone du champ de vision et ne sont sensibles qu'à une direction de mouvement prédéterminée, voire même à une amplitude particulière. Ces capteurs, inspirés de ceux de la mouche, donnent, cependant, de très bons résultats dans des environnements réels contenant de forts contrastes. Un chapitre de ce livre est consacré à ces travaux.

La présence d'objets mobiles dans l'environnement peut poser problème à ce type d'approche : ils vont créer des mouvements parasites qui ne seront pas dûs aux mouvements propres au drone. Dans le cas d'un mouvement en direction du drone, le comportement effectif sera celui désiré, le système tournera et se déplacera pour éviter la collision. Les mouvements perpendiculaires à l'axe du drone par contre risquent de provoquer des décisions erronées. D'une manière générale, cette question reste encore à étudier. Pourtant, on peut espérer qu'avec une prise en compte statistique des mouvements perçus dans l'image et des objets mobiles occupant une faible part du champ de vision, le comportement exhibé sera correct.

La taille des obstacles à éviter est également une question délicate. Des obstacles étroits peuvent poser problème à une approche basée sur les mouvements moyens

dans une zone du champ de vision. Dans ce cas, une approche prenant en compte les mouvements maximums permettrait l'évitement. Cependant, ce type d'approche est très sensible au bruit et aux erreurs dans les mouvements détectés. Ces erreurs sont relativement courantes, surtout pour des objets ayant une texture périodique. Certains algorithmes y sont relativement robustes [SIM 95]. Néanmoins la survenue d'erreurs reste très probable et rend les performances des contrôleurs basés sur les mouvements maximums très aléatoire.

### **1.5. Conclusion**

Ce chapitre a montré comment le flux optique, c'est-à-dire l'estimation des mouvements dans l'environnement immédiat à partir d'un capteur visuel, peut être utilisé simplement pour réaliser un évitement d'obstacle complet et efficace. Outre les obstacles latéraux et frontaux, le flux optique permet très simplement de réguler sa vitesse afin de l'adapter à l'encombrement de l'environnement immédiat. Le flux optique peut également être utilisé pour réguler son altitude, atterrir ou décoller en toute sécurité. La vision dispose de nombreuses autres utilisations, que ce soit pour faire de la reconnaissance des formes, du suivi de cible, ou tout simplement de l'observation déportée. Le poids très faible des capteurs visuels, son coût réduit et l'éventail des possibilités qu'ils offrent font donc de la vision, une modalité sensorielle privilégiée pour des plateformes volantes disposant de peu de charge utile.

## Chapitre 2

# Bibliographie

- [BAR 94] BARRON J., FLEET D., BEAUCHEMIN S., « Performance of optical flow techniques », *International Journal of Computer Vision*, vol. 12, p. 43 - 77, 1994.
- [BAR 00] BARROWS G., NEELY C., « Mixed-Mode VLSI Optic Flow Sensors for In-Flight Control of a Micro Air Vehicle », *Critical Technologies for the Future of Computing, SPIE*, vol. 4109, 2000.
- [BAR 02] BARROWS G., CHAHL J., M.V. S., « Biomimetic visual sensing and flight control », *Bristol UAV conference*, 2002.
- [BEA 95] BEAUCHEMIN S., BARRON J., « The Computation of Optical Flow », *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 27, p. 433 - 466, 1995.
- [BRO 86] BROOKS R. A., « A Robust Layered Control System for a Mobile Robot », *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986.
- [CAM 97] CAMUS T. A., « Real-time quantized optical flow », *The Journal of Real-Time Imaging*, vol. 3, page 71-86, 1997.
- [CHA 04] CHAHL J., SRINIVASAN M., ZHANG H., « Landing Strategies in Honeybees and Applications to Uninhabited Airborne Vehicles », *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, p. 101-110, 2004.
- [DAV 02] DAVISON A., « SLAM with a single camera », *5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles.*, 2002.
- [DON 06] DONCIEUX S., MOURET J., MURATET L., MEYER J.-A., « Building an Artificial Bird : Goals and Accomplishments of the ROBUR Project », *Proceedings of the European conference on Micro-Air Vehicles*, Braunschweig, 2006, (to appear).
- [FRA 86] FRANCESCHINI N., BLANES C., OUFAR L., Passive, non-contact optical velocity sensor, Rapport n° 51 549, ANVAR/DVAR, Paris, 1986, (in French).
- [FRA 92] FRANCESCHINI N., PICHON J., BLANES C., « From insect vision to robot vision », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, vol. 4, n° 4, p. 283-294, 1992.



- [GAL 05] GALBRAITH J., KENYON G., ZIOLKOWSKI R., « Time-to-Collision Estimation from Motion Based on Primate Visual Processing », *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 27, n° 8, p. 1279-1291, August 2005.
- [HAR 88] HARRIS C., STEPHENS M., « A combined corner and edge detector », *Proceedings of 4th Alvey Vision Conference*, p. 147-151, 1988.
- [HAR 00] HARRISON R., KOCH C., « A robust analog VLSI Reichardt motion sensor », *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 24, p. 213-229, 2000.
- [HAS 56] HASSENSTEIN B., REICHARDT W., « Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen-, und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungsperzeption des Russelkafer *Chlorophanus* », *Z. Naturforsch.*, vol. 11b, p. 513-524, 1956.
- [HOR 81] HORN B., SCHUNCK B., « Determining optical flow », *Artificial Intelligence*, vol. 17, p. 185-203, 1981.
- [HRA 06] HRABAR S. E., Vision-Based 3D Navigation for an Autonomous Helicopter, PhD thesis, University of Southern California, 2006.
- [JUN 04] JUNG I., Simultaneous Localization and Mapping in 3D Environments with Stereo-vision, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [LAN 04] LANGER M., MANN R., « *Optical Flow and Beyond* », Chapitre On the Computation of Image Motion and Heading in a 3-D Cluttered Scene, p. 259-274, Kluwer Academic Press, 2004.
- [LON 81] LONGUET-HIGGINS H., « A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections », *Nature*, vol. 293, p. 133-135, 1981.
- [LUC 81] LUCAS B., KANADE T., « An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision », *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 1981.
- [MEY 77] MEYER D. B., « The avian eye and its adaptations », CRESCITELLI F., Ed., *The Visual System in Vertebrates, Handbook of Sensory Physiology*, vol. VII, p. 549-611, Berlin : Springer, 1977.
- [MOR 77] MORAVEC H. P., « Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance », *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 2, page 584, August 1977.
- [MOR 80] MORAVEC H., Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rove, PhD thesis, Stanford, April 1980.
- [MUR 03] MURATET L., DONCIEUX S., MEYER J., PIRIM P., DRUOT T., « Système d'évitement d'obstacles biomimétique basé sur le flux optique. Application à un drone à voilure fixe en environnement urbain simulé. », *Journées Micro Drones*, 2003.
- [MUR 05] MURATET L., DONCIEUX S., BRIÈRE Y., MEYER J.-A., « A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50, n° 4, p. 195-209, 2005.

- [NEU 02] NEUMANN T. R., BÜLTHOFF H. H., « Behavior-Oriented Vision for Biomimetic Flight Control », *Proceedings of the EPSRC/BBSRC International Workshop on Biologically Inspired Robotics - The Legacy of W. Grey Walter*, HP Labs Bristol, UK, p. 196–203, 2002.
- [OH 04] OH P., « Flying Insect Inspired Vision for Micro-Air-Vehicle Navigation », *Autonomous Unmanned Vehicles System International Symposium*, 2004.
- [RUF 03] RUFFIER F., FRANCESCHINI N., « OCTAVE, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of Micro-Air- Vehicles », ET AL. A. R.-V., Ed., *SPIE Conf. on Bioengineered and Bioinspired Systems*, vol. 5119-2, Bellingham, USA, p. 1–12, 2003.
- [SAE 06] SAEEDI P., LAWRENCE P., LOWE D., « Vision-Based 3-D Trajectory Tracking for Unknown Environments », *IEEE transactions on robotics*, vol. 22, n° 1, p. 119-136, February 2006.
- [SCH 99] SCHILSTRA C., VAN HATEREN J., « Blowfly flight and optic flow. i. thorax kinematics and flight dynamics », *The Journal of Experimental Biology*, vol. 202, p. 1481-1490, 1999.
- [SIM 93] SIMONCELLI E., Distributed Representation and Analysis of Visual Motion, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science, 1993.
- [SIM 95] SIMONCELLI E., FREEMAN W., « The Steerable Pyramid : a Flexible Architecture for Multi-Scale Derivative Computation », *2nd IEEE International Conference on Image Processing*, 1995.
- [SIN 92] SINGH A., « Optic flow computation : a unified perspective », *IEEE Computer Society Press*, 1992.
- [SRI 91] SRINIVASAN M., LEHRER M., KIRCHNER W., ZHANG S., « Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees », *Visual Neuroscience*, vol. 6, p. 519-535, 1991.
- [SRI 96] SRINIVASAN M., ZHANG S., LEHRER M., COLLETT T., « Honeybee navigation en route to the goal : Visual flight control and odometry », *The Journal of Experimental Biology*, vol. 199, p. 237–244, 1996.
- [TUC 00] TUCKER V. A., « The deep fovea, sideways vision and spiral flight paths in raptors », *J. Exp. Biol.*, vol. 203, p. 3745–3754, 2000.
- [WAL 42] WALLS G. L., « The Vertebrate Eye and Its Adaptive Radiation », Bulletin n° 19, Cranbrook Institute of Science, Bloomfield Hills, Michigan, 1942.
- [ZUF 05a] ZUFFEREY J., Bio-inspired vision-based flying robots, PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [ZUF 05b] ZUFFEREY J., FLOREANO D., « Toward 30-gram Autonomous Indoor Aircraft : Vision-based Obstacle Avoidance and Altitude Control », *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (ICRA'2005)* [ZUF 05a], 2005.