

MICRO-CHARGES UTILES DÉDIÉES À L'ACQUISITION DE DONNÉES PAR DRONE POUR L'ÉTUDE DES ZONES NATURELLES

Antoine Gademer¹, Loïca Avanthey^{1,2}, Laurent Beaudoin¹, Michel Roux², Jean-Paul Rudant³

1: Laboratoire ATIS, ESIEA, 9 rue Vésale, 75005 Paris, France

2: Laboratoire LTCI, Institut Mines-Télécom Télécom Paristech, 46 rue Barrault, 75013 Paris, France

3: Laboratoire ESYCOM, Université de Marne-la-Vallée, 5 boulevard Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France

Résumé

Les dernières années ont montré l'intérêt croissant de la télédétection basse altitude (TBA) pour l'étude de zones naturelles. Mais au-delà de la problématique d'accès au milieu, la cartographie de ces zones à grande échelle pose de nombreuses contraintes sur la partie capteurs d'acquisition. En effet, ce sont des milieux difficiles pour les algorithmes classiques de traitement d'images : intrinsèquement en mouvement (aux échelles d'observations des individus), composés d'objets difficilement discernables, ces milieux présentent des conditions météorologiques variables, voir hostiles (éclairage, humidité, température, etc.). Cette cartographie se place généralement dans une étude thématique qui rajoute ses propres contraintes opérationnelles (besoin d'information 3D comme le relief ou la rugosité, signature spectrale spécifique, prises de vues obliques pour simplifier l'identification visuelle par les experts, etc.). Par ailleurs, l'utilisation en télédétection basse altitude de porteurs légers, comme les micro-drones, limite fortement les ressources disponibles pour les capteurs : puissance de calcul embarquée, encombrement, poids, etc.. Nous présenterons dans cet article deux capteurs : le capteur tri-caméras et le banc stéréoscopique uEye. Le capteur tri-caméras a été développé en 2009 pour l'acquisition d'images stéréoscopiques ou obliques à basse altitude. En analysant l'expérience tirée des campagnes terrains effectuées, nous soulignerons l'importance cruciale de la synchronisation précise des prises de vues. Nous présenterons alors notre nouveau banc stéréoscopique amphibie en développement depuis 2013, et qui vise la possibilité d'acquisitions stéréoscopiques parfaitement synchronisées, ce qui en fait un outil idéal pour l'étude des zones littorales (pour la télédétection basse altitude ou *in situ* à faible profondeur). Nous terminerons par une présentation des premiers résultats obtenus avec ce nouveau banc.

Mots clés : Télédétection basse altitude, Télédétection *in situ*, capteur stéréoscopique, capteur amphibie, espaces naturels, synchronisation

Abstract

*The recent years have shown a growing interest in low-altitude remote sensing (LARS) for the study of natural areas. But beyond the problematic of access to the study environment, the mapping of these areas on a large scale poses many constraints on acquisition sensors. Indeed, these environments are difficult for traditional image processing algorithms : inherently moving (at observations scales of individuals), composed of hardly distinguishable objects, these environments have varying weather conditions, sometimes hostile (lighting, humidity, temperature, etc.). This mapping is usually up in a thematic study which adds its own operational constraints (need for 3D information as relief or roughness, specific spectral signature, oblique views to simplify visual identification by experts, etc.). Furthermore, the use of low altitude remote sensing lightweight carriers, such as micro-drones, severely limits the available resources for sensors : onboard power calculation, size, weight, etc.. We present in this article two sensors : the tri-cameras sensor and the uEyes stereoscopic rig. The tri-cameras sensor was developed in 2009 for the acquisition of stereoscopic or oblique views at low altitude. By analyzing the experience of ground mission, we will emphasize the crucial importance of a precise synchronization of between the stereoscopic shots. We then present our new amphibious stereoscopic rig that we are developing since 2013. We designed it so it will offer the possibility of acquire perfectly synchronized stereoscopic images, which makes it an ideal tool for the study of coastal areas (for low altitude remote sensing and *in situ* at low depth). We conclude with a qualitative analysis of the first results obtained.*

Keywords : Low altitude remote sensing, *In situ* remote sensing, stereoscopic sensor, waterseal sensor, natural environment, synchronisation

1. Télédétection basse altitude et télédétection *in situ*

La télédétection basse altitude (TBA) regroupe l'ensemble des moyens techniques permettant de faire l'ac-

quisition de paramètres de surface à une faible distance de la scène observée (< 150 m en aérien, < 10 m sous l'eau). Lorsque l'acquisition s'effectue directement au sein du milieu d'étude, comme c'est le cas pour le milieu sous-marin, nous parlons alors de télédétection *in situ*.

Ces deux types de télédétection permettent d'obtenir des informations beaucoup plus denses (résolutions métriques à subcentimétriques) que les télédétections aérienne et spatiale ou la bathymétrie navale, en échange d'une fauchée fortement réduite (Gademer, 2010).

En apportant ainsi une échelle intermédiaire entre la télédétection classique et les relevés terrains (campagnes de mesures directes par des experts sur la zone d'étude), les télédétections basse altitude et *in situ* sont très intéressantes pour l'étude des environnements naturels (Gademer et al., 2013). En effet, d'une part, une analyse beaucoup plus fine est rendue possible, que ce soit du point de vue de la répartition des espèces, de l'occupation des sols ou de l'identification des individus de tailles très variées (particulièrement les individus de petites tailles qui n'étaient pas identifiables à basse résolution). Et d'autre part, les outils systèmes utilisés permettent d'assouplir certaines contraintes opérationnelles (adaptation à la météorologie, aux cycles phénologiques¹ des espèces, temps de revisite fréquent pour une analyse de la dynamique, etc.) et de tendre vers des acquisitions locales « à la demande ».

Enfin l'accès à des prises de vue à l'échelle des individus autorise la combinaison des avantages de la télédétection (pérennité des acquisitions, répétabilité, automatisation et systématisation, analyse différée possible) et les notions essentielles des mesures directes et de certification par l'expert issues des relevés terrain (Gademer, 2010).

Aujourd'hui, la plupart des systèmes d'acquisition employés en TBA utilisent des plateformes provenant généralement du monde du loisir ou de l'aéromodélisme : ballons, cerfs-volants, modèles réduits ou micro-drones (UAV). Pour la télédétection *in situ*, les difficultés liées au milieu restreignent encore son accès aux projets de recherche (UUV en sous-marin et USV à la surface).

Concernant les capteurs embarqués, la majorité des projets utilisent des appareils photographiques ou des caméras du commerce sans adaptation majeure à la plateforme utilisée ou à l'étude thématique. Or c'est justement sur cet axe que le besoin d'innovation nous semble le plus grand.

Nous présenterons dans la suite de cet article deux capteurs développés spécifiquement pour la cartographie des milieux naturels avec des moyens de télédétection basse altitude ou *in situ* après avoir mis en évidence les différentes contraintes opérationnelles.

2. Contraintes liées aux milieux naturels

Les milieux auxquels nous nous intéressons sont les zones forestières et landaises ainsi que les zones littorales (côte, estrans, fonds sous-marins à faible profondeur).

1. La phénologie est une science qui étudie l'influence des variations climatiques sur certains phénomènes périodiques de la vie des plantes (germination, floraison...) et des animaux (migration, hibernation, ...).



FIGURE 1: Exemple de zones naturelles

Les zones naturelles diffèrent en de nombreux points des zones urbaines ou des espaces intérieurs et se caractérisent généralement par des assemblages très complexes.

Beaucoup moins structurées, elles sont composées d'objets intriqués, difficilement discernables et souvent en mouvement. En effet, la flore, très présente et très diversifiée, bouge lorsqu'elle est soumise aux différents éléments météorologiques en jeu comme le vent ou les courants sous-marins. De plus, la faune n'est plus négligeable à cette échelle et s'y déplace de manière indépendante.

Les conditions d'éclairage et de visibilité, dépendant du soleil (source naturelle), sont changeantes (saisons, heure, latitude, météorologie, etc.) et peuvent être fortement dégradées (comme c'est souvent le cas dans le milieu sous-marin).

D'autres facteurs, plus ou moins hostiles, rentrent aussi en compte, comme la température, l'humidité, la pression ou encore la salinité.

Enfin, dans le milieu sous-marin, l'absence de système de positionnement globale précis (comme le GPS) complique l'acquisition des données et leur analyse. En effet, si l'on ne sait pas où est-ce que l'on est, il est difficile de savoir ce que l'on observe.

3. Contraintes applicatives

L'identification des besoins utilisateurs est essentielle dans un processus de conception de nouveaux outils. Les travaux de Gademer (2010) et Mobaied (2011) ont montré l'apport de la télédétection basse altitude pour l'identification des espèces végétales dans le suivi de la biodiversité. Le besoin principal identifié concerne la création d'orthophotographies très haute résolution permettant la cartographie des groupes phytogéographiques² en temps différé de celui de l'acquisition. Contrairement aux images aériennes classiques sur lesquelles il n'est possible de distinguer que les grandes familles (bruyères, graminées, boisements), ces données – dans ces études, des images prises à 75 m avec une taille de pixel au sol de 2 cm – offrent la possibilité d'identifier de manière fine les espèces ligneuses (callune, molinie, etc.) voire de distinguer des espèces plus discrètes (bruyère cendrée, petite oseille, etc.) en diminuant encore la taille du

2. Un groupe phytogéographique est un groupe végétal spatialement délimité aux propriétés (espèce, âge, taille, etc.) homogènes.

pixel au sol. Lorsque les images sont corrigées géométriquement (orthoimages) et géoréférencées, elles peuvent être combinées avec d'autres images et permettre des études plus complexes ou encore des analyses de changements dynamiques d'une période à une autre.

Des études annexes, comme celle de Petrie (2009), identifient aussi une forte valeur ajoutée pour les images obliques qui permettent l'estimation de la hauteur des individus ainsi qu'une vision d'ensemble de la zone d'étude et donc une meilleure appréhension des relations spatiales des différents éléments, autorisant une interprétation plus riche par le spécialiste.

Enfin, Petitpas (2011) montre l'intérêt de la reconstruction de modèles tridimensionnels des scènes observées qui permettent d'extraire des informations dendrométriques³, essentielles aux botanistes et forestiers et des informations de rugosité destinées à l'interprétation des signaux radar.

En terme de système, Vioix (2004) et l'IFN (2010) mettent en avant le besoin d'une souplesse opérationnelle sur le moment et le nombre d'acquisition pour utiliser au mieux les propriétés phénologiques (date de floraison, comportement diurne/nocturne) des individus observés.

4. Contraintes liées aux vecteurs d'acquisition

Par ailleurs, l'utilisation en télédétection basse altitude de porteurs légers, comme les micro-robots d'exploration, limite fortement les ressources disponibles pour les capteurs qu'ils emportent : puissance de calcul embarquée, encombrement, poids, etc..

En aérien, la charge utile d'un avion ou d'un hélicoptère est la masse transportable par le vecteur en plus de son propre poids. On la calcule à partir de la poussée totale produite par l'ensemble des couples moteur-hélice. Il est d'usage de considérer qu'il faut fournir en poussée le double du poids de l'appareil pour pouvoir voler (par exemple pour un poids total de 100 g il faut fournir une poussée totale d'environ 200 g à répartir sur l'ensemble des moteurs, soit 25 g par moteur pour un quadricoptère). À cette capacité d'emport théorique ainsi obtenue, il faut ensuite soustraire le poids à vide de l'appareil et le poids énergétique (variable pour les moteurs à explosions, fixe pour les batteries électriques) pour obtenir la charge utile. La charge utile moyenne d'un micro-drone se situe généralement entre 200 g et 1 kg. Certains drones des catégories supérieures ou certains aéromodèles peuvent emporter entre 5 et 10 kg, mais les contraintes économiques et législatives sont alors beaucoup plus élevées.

$$Poussee * nbMoteurs \approx 2 * (P_{vide} + P_{utile}) \quad (1)$$

$$P_{utile} \approx \frac{Poussee * nbMoteurs}{2} - P_{vide} \quad (2)$$

3. La dendrométrie représente la caractérisation et les mesures physiques effectuées sur la végétation (hauteur ou forme des végétaux, répartition ou densité de peuplement, etc.).

En environnement sous-marin, la contrainte de taille prend le pas sur celle de poids mais avec une conséquence similaire sur la capacité de calcul et l'autonomie énergétique. La charge utile moyenne des petits vecteurs sous-marin se situe entre quelques kilogrammes et plusieurs dizaines de kilogrammes. À titre d'exemple notre UUV Ryujin peut emporter aux alentours d'1 kg de charge utile. On recherche généralement une flottabilité neutre pour les vecteurs afin de minimiser l'énergie nécessaire au contrôle du système (peu d'effort pour se maintenir à une profondeur donnée). La flottabilité est dépendante du poids et du volume du vecteur. La charge utile correspond alors à la différence entre le poids du véhicule à vide (ainsi que son poids énergétique) et le poids de flottabilité neutre.

Enfin, il est à noter que la flottabilité va légèrement différer en fonction de la densité de l'eau du milieu d'étude (concentration plus ou moins importante des sels minéraux) (Christ et Wernli, 2008), et la charge utile peut donc varier de quelques centaines de grammes entre des eaux de piscine et les eaux beaucoup plus denses de la Méditerranée.

Fg_N la force de gravité, $g0_{m/s-2}$ la pesanteur normale :

$$\begin{aligned} Fg_N &= masse_{kg} * g0_{m/s-2} \\ &= masse_{kg} * 9,80665 \end{aligned} \quad (3)$$

Fb_N la force de flottabilité (poussée d'Archimède), densité de l'eau = 1.

$$\begin{aligned} Fb_N &= masse_{kg} * g0_{m/s-2} \\ &= \frac{(1g * volume_{cm^3} / 1_{cm^3})}{1000g} * 9,80665 \\ &= volume_{cm^3} / 1000g * 9,80665 \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_{vide} + P_{utile} \approx Fb_N \quad (5)$$

Il est à noter que ceci est un processus de détermination cyclique : l'ajout de poids nécessite des moteurs plus puissants, qui par leur consommation plus grande nécessitent l'emport de batteries plus lourdes, jusqu'à arriver à un équilibre technologique.

5. Capteur multi-caméras Tri-cam

C'est donc dans ce contexte opérationnel de télédétection basse altitude appliquée à la cartographie de la biodiversité végétale que nous avons développé en 2009 un capteur multi-caméras permettant l'acquisition simultanée de prises de vues stéréoscopiques ou obliques et dimensionné pour les vecteurs volants légers.

À l'époque, les micro-drones civils (< 5 kg) étaient encore l'exception et les mini-drones (< 30 kg) nécessitaient un investissement financier et logistique relativement important (~10 k€, véhicule de transport dédié, piste de décollage, etc.). Les capteurs utilisés sur ces porteurs consistaient majoritairement en des appareils photographiques numériques reflex munis d'un déclencheur radio-commandé ou d'un minuteur.

Si cette solution peut être satisfaisante pour la réalisation d'orthophotographies (une fois résolus les problèmes de vibration et d'horizontalité de la caméra), elle

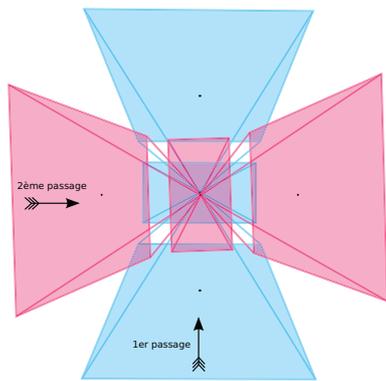


FIGURE 2: Simulation d'un système en « croix de malte » par deux passages successifs.

est cependant généralement incompatible avec la stéréorestitution. En effet, les mouvements brusques des micro-drones volants, beaucoup plus sensibles aux rafales de vent que leurs homologues plus lourds et le mouvement inhérent aux milieux naturels observés infirme l'hypothèse sous-jacente d'une scène parfaitement identique acquise depuis les différents points de vues des images stéréoscopiques.

La solution généralement adoptée en stéréovision pour palier aux grands mouvements est d'utiliser deux caméras plutôt qu'une seule, regardant dans la même direction mais séparées d'une distance fixe pour obtenir deux points de vues différents. Les acquisitions réalisées par les deux appareils, déclenchées en même temps, sont ainsi suffisamment proches temporellement l'une de l'autre pour limiter l'amplitude des mouvements entre les images. Mais cette solution avec une caméra supplémentaire n'était généralement pas retenue en télédétection basse altitude à cause des limitations de taille et de poids imposés à la charge utile des vecteurs légers.

Ayant perçu, avec l'arrivée des appareils photographiques numériques compact – dont la qualité optique semblait malgré tout compatible avec nos applications (Shor-tis et al., 2006) –, la possibilité de faire sauter ce verrou technologique nous avons décidé de construire un banc stéréoscopique léger.

Convaincu de l'intérêt fort des images obliques, nous avons même fait le pari d'ajouter un troisième appareil et de rendre les trois appareils orientables à la demande (soit à 45°, soit au nadir). Cela donne la possibilité de réaliser des couples stéréoscopiques avec au moins deux appareils photographiques, le dernier prenant des vues obliques. Ou bien de faire des acquisition obliques (45° avant, 45° arrière) simultanément à une acquisition au nadir.

5.1. Support et réalisation mécanique

L'avantage du système tri-caméras établi, sa réalisation nous confrontait cependant à quelques contraintes techniques.

La première contrainte concerne le poids. Se basant sur une estimation de 200 g pour chaque appareil photographique, un système tri-caméras devait peser autour

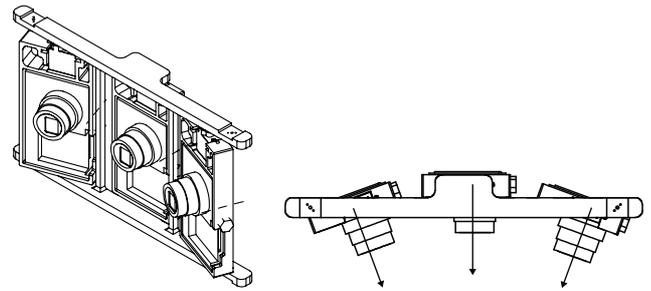


FIGURE 3: Schéma de conception du capteur. Les appareils photos sont alignés dans l'axe de vol et sont orientable à la demande (ici pour les acquisitions obliques).

de 800 g en comptant la structure et les servo-moteurs dédiés à l'asservissement. Dans l'optique d'un système multi-caméras directionnel, la référence en télédétection aéroportée est le système « croix de malte » qui nécessite cinq appareils photographiques — un vertical et quatre orientés de manière oblique. Ce système n'est cependant pas envisageable à notre échelle pour des raisons de poids, mais peut être simulé en augmentant le nombre de passages lors de l'acquisition, ce qui est illustré par la figure 2. Sur ce schéma, on voit également qu'en recalant les images au nadir l'une par rapport à l'autre, il est possible de retrouver précisément la géométrie relative entre les images obliques et donc leur géoréférencement.

Afin de rendre le système modulaire, nous avons décidé d'associer un servo-moteur à chaque appareil pour contrôler individuellement leur orientation selon l'axe de tangage. La disposition finale, illustrée à la figure 3 est composée de trois supports individuels qui permettent l'intégration d'appareils photographiques du commerce. Ils sont alignés pour former la structure principale du capteur. En fonction de la mission, on associe une consigne d'orientation à chaque servo-moteur. Cette consigne reste fixe durant le vol, faisant du capteur un bloc rigide permettant de simplifier les calculs d'orientation relative menés lorsque l'on cherche à retrouver la géométrie d'acquisition.

5.2. Choix du modèle d'appareil photographique numérique

Il existe de nombreux types de capteurs imageurs sur le marché mais on peut distinguer deux grandes familles : les capteurs (comme les caméras analogiques ou les webcams) et les appareils (comme les appareils photographiques numériques ou les caméscopes).

Les capteurs ont généralement l'avantage d'un contrôle plus fin du processus d'acquisition (déclenchement, datation) et permettent aussi un traitement des données acquises sous forme de flux. Ils nécessitent cependant une alimentation dédiée et un ordinateur pour le stockage des vidéos ou des images.

Les appareils ont l'avantage d'être autonomes en terme d'alimentation et de stockage, en revanche ils présentent un contrôle plus réduit et ne permettent qu'un post-traitement



FIGURE 4: L'appareil photographique compact choisi avant (170g) et après (119g) amaigrissement.

des données bien que la plupart offrent la possibilité d'un flux vidéo basse résolution en parallèle.

Dans notre cas, n'ayant pas pour objectif de traiter les données en vol et afin de limiter l'encombrement en évitant l'ajout d'un ordinateur embarqué, nous avons choisi d'utiliser des appareils photographiques numériques du commerce.

Devant la diversité de l'offre, nous avons réalisé un comparatif regroupant plus de quarante appareils compacts, basé sur de nombreux critères (poids, taille, prix, vitesse de prise de vue, mode rafale, stabilisation, réglages manuels, résolution, etc.).

Finalement, c'est le modèle Pentax Optio A40, que l'on voit sur la figure 4 qui fut choisi : 12 Mégapixels, capteur stabilisé, mode rafale continu illimité, télécommande, réglages manuels pour seulement 170 grammes.

5.3. Électronique de contrôle et station sol

Nous avons vu précédemment que le choix d'un appareil photographique comme capteur imageur implique un contrôle plus réduit que ce qu'offrent les produits de la catégorie des capteurs. Cela nous mène à la problématique du déclenchement de la prise de vue à distance, et qui plus est, du déclenchement simultané sur plusieurs appareils.

En effet, ces appareils sont conçus pour être manipulés directement par des humains et non pas par un système électronique.

Pour pallier à cela, certains projets (illustrés à la figure 5) utilisent un servomoteur qui appuie sur le bouton du déclencheur, d'autres exploitent le capteur infrarouge utilisé par certains appareils livrés avec une télécommande (système PRISM), d'autres encore utilisent des fonctionnalités de déclenchement par le port USB disponibles sur des appareils comme les Canon ou Nikon (système URBI). Ces techniques sont dites non-intrusives car elles ne nécessitent pas d'ouvrir l'appareil photographique.

L'appareil photographique que nous avons choisi possédait ainsi un contrôle infrarouge pour déclencher la prise de vue par télécommande. Néanmoins, lors de nos tests, il s'est révélé que le mode télécommande impliquait une fréquence de prise de vue très basse — environ trois à quatre secondes entre deux photographies — et une synchronisation déplorable entre les appareils (entre 3 à 4 secondes). Cette solution fut donc rapidement écartée.

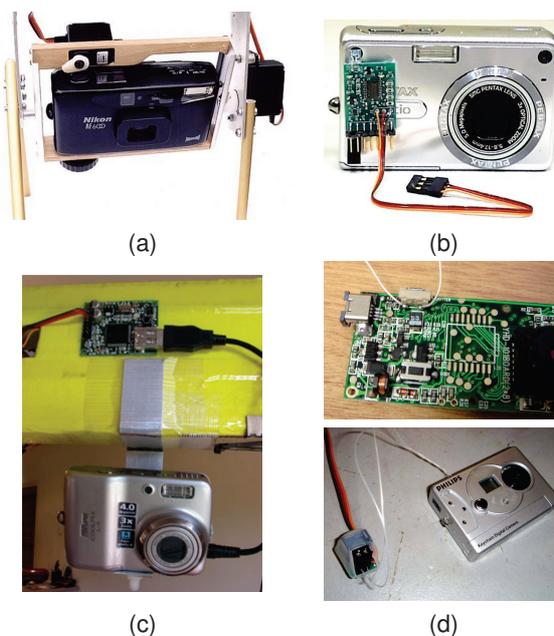


FIGURE 5: Systèmes de déclenchement courants (a) Avec un servo-moteur. — (b) Simulant une télécommande infrarouge. — (c) Utilisant le port USB. — (d) Relai électronique.

Une solution efficace mais intrusive consiste à court-circuiter le bouton de déclenchement grâce à un système électronique servant d'interrupteur. On trouve dans le commerce des relais électroniques comme le système PicoSwitch obéissant aux signaux PWM utilisés en aéromodélisme.

Dans notre cas, le fait de manipuler trois appareils simultanément impliquait de multiplier ces interfaces et nous avons préféré réaliser notre propre carte électronique permettant de contrôler de manière centralisée l'allumage et le déclenchement de nos appareils.

Une autre problématique liée à l'usage d'appareils photographiques compacts est la datation des images par rapport au temps du système (GPS, AHRS, etc.) ce qui est nécessaire pour avoir un géoréférencement précis.

Enfin, pour assurer la complétude des données, il est souvent nécessaire de valider que l'ordre de déclenchement d'une prise de vue a été effectif car les conditions internes de l'appareil ne sont pas toujours réunies et nos tests ont montré rapidement que de nombreux clichés peuvent être manquants.

Or généralement les systèmes proposés dans le commerce ne s'occupent que du déclenchement : les appareils doivent être allumés manuellement et les utilisateurs doivent se contenter de la datation interne de l'appareil, récupérée dans les métadonnées EXIF (précise à la seconde dans le temps de l'appareil, difficile à synchroniser entre appareils) et n'ont pas de retour sur la prise effective des images demandées outre l'interface visuelle.

Là encore, nous espérons trouver une solution à ces deux problématiques en accédant directement à l'électronique de l'appareil photographique.

Nous avons donc démonté les appareils photogra-

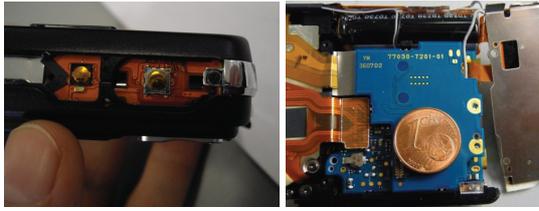


FIGURE 6: Démontage de l'Optio A40. Ce démontage a pour objectif de réduire le poids de l'appareil et de l'interfacer avec l'électronique de contrôle.

phiques avec le double objectif de comprendre leur fonctionnement et d'enlever toutes les parties qui les alourdissaient inutilement, comme on peut le voir sur la figure 6.

Le poids de l'appareil fut réduit par cette opération de 170 g à 119 g (comme on peut le voir sur la figure 4), soit un amaigrissement de 30 %. Ce gain n'est pas aussi important que l'on pouvait l'espérer car, une fois enlevés la coque extérieure et l'écran, nous avons dû garder une grande partie de la structure sur laquelle était fixées les cartes électroniques et l'optique et qui ne pouvait être enlevée sans disloquer complètement l'appareil.

Une fois l'accès à l'électronique de l'appareil obtenu, nous nous sommes intéressés au déclenchement et à la mise sous tension. On peut voir sur la figure 6, en haut à droite, les deux boutons poussoirs — autrement appelés activateurs électromécaniques — numériques correspondant respectivement à la mise sous tension et au déclenchement de la prise de photographie.

Dans la plupart des appareils photographiques récents, ces contacteurs électroniques ont remplacé les boutons mécaniques. Ils fonctionnent sur le principe d'une différence de voltage selon une logique numérique (0 ou 1), la pression du bouton provoque une action au sein du microprocesseur qui déclenche la séquence d'acquisition.

Nous avons donc établi qu'en mettant directement à l'état haut (3.3V) les bornes du processeur de l'appareil correspondant au déclenchement et à la mise sous tension nous pouvions contrôler deux des principaux processus de l'appareil. L'appareil étant capable de mémoriser les réglages (vitesse d'obturation, ouverture, focale à l'infini, etc.) de prise de vue d'un allumage à l'autre, nous avons un système quasiment fonctionnel.

Il est légitime de se demander pourquoi il est nécessaire de contrôler la mise sous tension aussi bien que le déclenchement ; à notre connaissance, l'ensemble des systèmes (aéromodèle ou drone) proposés dans le commerce ne le font pas et les appareils photographiques sont mis en route en même temps que le porteur, avant le décollage. Dans notre cas, nous avons considéré que la capacité de mise sous tension était un avantage important pour deux raisons ; tout d'abord pour limiter la hauteur de la charge utile. Notre quadri-rotor étant petit, l'espace disponible au niveau du train d'atterrissage est assez réduit. Notre système tri-caméras étant tout de même assez imposant, il devenait nécessaire de rentrer

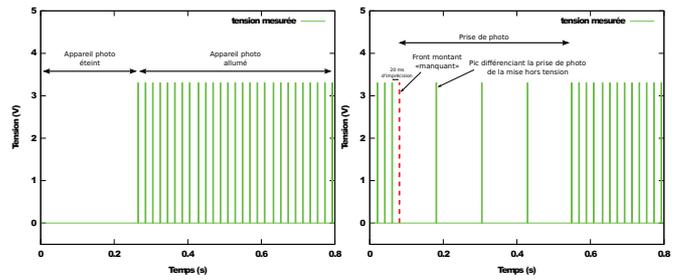


FIGURE 7: Signal de maintenance de l'Optio A40. À gauche, en observant ce signal on peut détecter la mise sous tension (ou hors tension) de l'appareil. — À droite, on peut aussi détecter et dater la prise de photo, car le signal change de période durant l'acquisition.

les objectifs avant de se poser : comme ceux-ci sont majoritairement orientés vers le bas, un appui même bref sur les optiques pourrait les rayer.

La seconde raison est d'ordre opérationnelle : lors du décollage et de l'atterrissage les systèmes à voilure tournante (hélicoptères ou multi-rotors) produisent des tourbillons d'air, appelés effet de sol, qui sont dus à la force du souffle qui se projette sur le sol. Ces tourbillons lèvent énormément de poussières même si cette phase reste brève. En allumant les appareils après cette phase et en les éteignant avant l'atterrissage, on s'assure de limiter la quantité de poussières qui entre dans les optiques, ce qui endommagerait les appareils et nuirait à la qualité des photographies.

Après plusieurs tests, la qualité mesurée de synchronisation des appareils photographiques entre eux est de 50 millisecondes en moyenne pour des prises de photographies au coup par coup. De plus, la réactivité des appareils permet de réduire l'intervalle entre deux photographies de 3 secondes (déclencheur infrarouge) à 1,5 secondes (déclencheur électronique). Malheureusement il arrive que certaines circonstances extérieures, souvent liées à la complexité de la scène acquise, empêchent le bon déroulement de la prise de photo. Bien que le système électronique réduise fortement ce risque par rapport au système infrarouge, il nous semblait important de pouvoir valider avec certitude que l'ordre avait bien été exécuté ou non.

Nous avons donc poussé plus loin nos analyses du fonctionnement des appareils pour découvrir des pastilles dont le signal dépendait de l'état interne de l'appareil, et se trouvaient sur l'une des cartes internes de l'appareil, comme l'illustre la figure 6 (à droite).

L'une d'entre elles, présentait en particulier un comportement intéressant, illustré à la figure 7 :

- alors que l'appareil était éteint, la tension mesurée entre la masse et la pastille était nulle (à droite),
- lorsque l'appareil était allumé, on pouvait observer un signal carré périodique passant à l'état haut durant deux millisecondes toutes les vingt millisecondes (à droite),
- enfin, lors de la prise de photo, ce même signal passait à une période de cent vingt millisecondes



FIGURE 8: Le capteur tri-caméra finalisé. À gauche, le capteur en position oblique. À droite, la carte de contrôle électronique.

(à gauche).

En observant les fronts montants de ce signal, nous pouvons donc connaître l'état de l'appareil — éteint ou allumé — et dater les photographies avec une précision de vingt millisecondes, cette précision étant liée à la périodicité du signal dans l'état normal de l'appareil.

Il est important de noter que d'un point de vue algorithmique, il nous faut aussi compter le nombre de pics « absents » pour différencier la prise de photographie d'une mise hors tension pure et simple, comme illustré sur la figure 7 (à droite).

Pour la réalisation de la carte, nous avons utilisé un microcontrôleur dsPIC 30F4011 de chez Microchip. Cette puce avait l'avantage d'intégrer de nombreuses fonctionnalités comme la gestion des signaux PWM — pour pouvoir facilement commander aux servo-moteurs —, la lecture de plusieurs signaux numériques en parallèle (*change notification* en anglais) pour pouvoir récupérer les dates de tous les appareils photographiques en même temps, ainsi que la production de signaux carrés pour la mise sous tension et le déclenchement des photographies. Enfin, cette puce pouvait être configurée pour implémenter le protocole Serial Peripheral Interface (SPI), ce dernier étant utilisé par la carte pour communiquer avec le vecteur volant.

Le protocole implémenté comprend :

- ⇒ réception des ordres de mise sous tension et de déclenchement
- ⇒ réception du signal de synchronisation des horloges
- ⇐ envoi des dates des photographies prises depuis la dernière demande
- ⇐ envoi des statuts des appareils photographiques.

On peut voir sur la figure 8 le capteur tri-caméra dans sa version finale.

5.4. Analyse des données acquises

Nous avons fait plusieurs campagnes de test avec le capteur tri-caméras. Le premier test s'est effectué au dessus d'une ornementation végétale de notre campus afin de tester la qualité de la synchronisation et le potentiel des images prises à des fins de stéréovision. On peut voir sur la figure 9 la qualité de la reconstruction obtenue.

Le second test a eu lieu en juin 2009, en collaboration avec une équipe de botanistes du Muséum nationale d'Histoire Naturelle, sur leur site d'étude dit de la "Mare aux joncs". L'objectif était d'identifier l'apport potentiel de



FIGURE 9: Exemple de couple stéréoscopique acquis avec le capteur tri-caméras et la restitution tridimensionnelle obtenue.



FIGURE 10: La rupture d'une hélice due à la chaleur a malheureusement eu raison de notre vecteur et de sa charge utile.

la télédétection basse altitude pour leurs études de suivi de la biodiversité. Environ 1800 clichés ont été pris durant les 5 h de vol, soit en position stéréoscopique, soit en oblique. Cependant les conditions d'acquisition ont été difficiles : un vent fort soufflait sur la lande ce jour là et gênait les déplacements du vecteur aérien. En effet, le vecteur, encore à l'état de prototype, ne possédait pas d'asservissement en altitude et nécessitait un pilotage manuel, à vue. L'ensoleillement important surexposait les photographies et la chaleur a même provoqué la rupture de l'une des hélices du drone et la fin prématurée du capteur tri-caméras à la suite du crash qui s'ensuivit, comme on peut le voir sur la figure 10.

Heureusement nous avons cependant pu extraire de ce jeu de données un certain nombre de clichés significatifs illustrés à la figure 11 : des clichés haute résolution pour l'identification des individus de petite taille, mais aussi des images obliques et des couples stéréoscopiques dont l'étude a posteriori a été très intéressante.



FIGURE 11: Exemple de données issue du capteur tri-caméras. En haut, identification précise des espèces ligneuses sur une portion d'orthomosaïque. Au milieu, image oblique permettant une vue d'ensemble de la zone d'étude. En bas, une reconstruction tri-dimensionnelle à partir d'un couple stéréoscopique.

En effet, nous avons pu observer qu'au delà des conditions extérieures de flou de bougé, certains clichés présentaient une disparité interne en terme de reconstruction. Si les troncs et les branches étaient reconstruits correctement, certains arbrisseaux, plus légers, ou encore les feuillages ne donnaient parfois aucun appariement comme mis en évidence à la figure 12. Et pour cause, le vent les avait fait bouger entre les deux prises de vue. Nous pouvons identifier trois facteurs qui peuvent expliquer cet asynchronisme : soit la synchronisation des prises de vues ($50 \mu s$) n'est pas suffisante devant la dynamique de la scène (le temps d'exposition, par exemple, n'est pas le même), soit le délai de traitement des images n'a pas été le même (en fonction de l'éclairage, de la complexité de la scène, etc.), soit la plante a bougé durant le temps d'exposition (ce qui provoque un flou synchronisé sur les deux images).

6. Capteur stéréoscopique uEye

Dans l'optique de remplacer notre précédent capteur, nous avons ajouté quelques éléments nouveaux au cahier des charges initial. D'une part, nous avons remarqué à la section précédente qu'il est nécessaire de renforcer le niveau de synchronisation du capteur afin de faire abstraction à la dynamique qui est propre aux milieux natu-



FIGURE 12: On voit sur cette carte de disparité, à droite, des "trous" correspondant à des parties de l'image n'ayant pas de correspondance dans l'autre image du couple. On peut voir sur l'image de gauche que ces trous correspondent à des bruyères qui ont bougées avec le vent !

rels. En effet, que ce soit en aérien ou en sous-marin, lorsque les conditions météorologiques sont très défavorables (fort vent, houle prononcée) il suffit de reporter l'acquisition mais lorsque ces conditions, sans être extrêmes, sont permanentes (il est rare que les courants ou la houle se stoppent, contrairement au vent) il nous faut un niveau de synchronisation plus avancé.

D'autre part, une nouvelle contrainte majeure que nous souhaitons ajouter est la possibilité d'utiliser le capteur dans le cadre de nos travaux sous-marins à faible profondeur, qui s'inscrivent dans la thématique d'études du littoral (fond marin et terres émergées). Cela implique que le capteur doit être étanche à l'immersion, insensible la corrosion et d'une qualité suffisante pour travailler avec la luminosité singulière du milieu aquatique.

Enfin, nous avons décidé d'ajouter une dernière contrainte : la possibilité d'accéder aux images à la volée pour pouvoir estimer par la suite la complétude des données (couverture et qualité des images) et avoir un retour sur la progression de la mission en quasi-temps réel. Cette contrainte permettra de surcroît d'utiliser les données dans le cadre de travaux sur la navigation, mais cela sort du cadre de cet article.

6.1. Synchronisation

Pour être efficace, la synchronisation doit se faire sur deux niveaux : même début d'acquisition et même durée d'acquisition. Pour obtenir un même début d'acquisition, il est nécessaire d'avoir en plus d'un déclenchement électronique de la prise de vue, une synchronisation des horloges internes des appareils et un délai fixe entre la réception du signal et le début effectif de l'acquisition (temps de préparation du capteur). Quant à la durée d'acquisition, elle est directement liée au temps d'exposition, ce dernier devant être fixe. Cependant le réglage de ce paramètre n'est pas simple car le temps d'exposition est dépendant des conditions d'éclairage extérieures mais aussi de la vitesse de déplacement du capteur. En effet, si la vitesse est trop élevée devant le temps d'exposition cela peut induire un flou de bougé. Il est à noter qu'il est préférable de désactiver tous les paramètres de réglage automatiques car ils introduisent des variations dans le temps d'acquisition (traitement dépendant de l'image en cours d'acquisition et des conditions extérieures perçues par le capteur). On peut voir

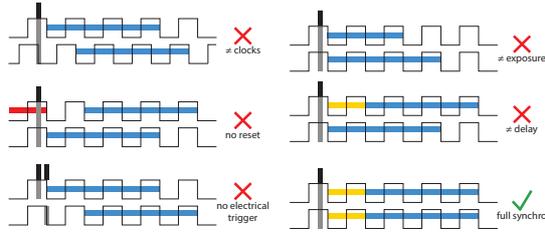


FIGURE 13: Différents cas amenant à une non synchronisation (mode haut-bas), seul le dernier cas correspond à une synchronisation totale.

l'influence de ces différents cas illustrés par des schémas dans la figure 13.

Il est quasiment impossible en pratique d'obtenir une synchronisation parfaite mais cependant nous cherchons à minimiser le décalage afin que l'erreur de synchronisation ne provoque pas un flou supérieur à un pixel.

Du point de vue de la vitesse de déplacement du capteur, de rapides calculs en se basant sur les équations 6 et 7 nous donnent pour la plupart des paramètres courants des caméras (p_{mm} la taille du pixel du capteur, f_{mm} la longueur focale) un écart maximum de synchronisation toléré entre 5 à 10 centièmes de seconde pour une vitesse d'1 km/h ($v_{mm/s}$) à une distance à la cible d'environ 3 mètres (H_{mm}).

$$GSD_{mm} = \frac{H_{mm} \times p_{mm}}{f_{mm}} \quad (6)$$

$$MaxSynchDelay_s = \frac{GSD_{mm}}{v_{mm/s}} \quad (7)$$

Quant à l'écart maximum de synchronisation relatif aux mouvements des objets de la scène observée, il doit être étudié au cas par cas à partir des mêmes équations en fonction de la zone d'étude, de ses caractéristiques et de la thématique dans laquelle s'inscrit l'étude.

Enfin, en ajoutant le temps de stockage des images en interne ou le temps de transfert des images sur une unité de calcul externe, nous obtenons le délai minimum entre deux acquisitions synchronisées successives (équation 8). Cette fréquence maximale d'acquisition est un paramètre fortement lié à la vitesse de déplacement du capteur car nous voulons pouvoir obtenir un taux suffisant de recouvrement entre les couples successifs (pour faire du mosaïquage par exemple).

$$T_{acq} = T_{preparation} + T_{exposure} + T_{transfer_max}(8)$$

Il est possible d'estimer expérimentalement le niveau de synchronisation du système. Le test le plus simple, qui permet également de mesurer la précision de la fréquence d'acquisition, est de prendre des images d'un compteur numérique (précis au moins au centième de seconde, si possible au millième).

Comme on le voit dans la figure 14, il est possible d'envisager des tests basés sur la position comme prendre des images d'une balle qui tombe, de pales colorées tournées à la main, d'un flash qui se propage sur une

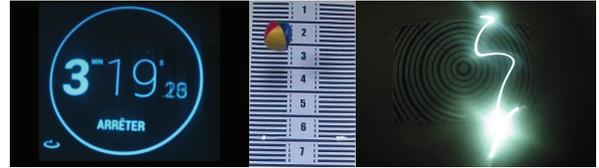


FIGURE 14: Estimation de la précision de synchronisation d'un système soit par le biais d'une horloge numérique précise, soit à l'aide de cibles visuelles et des objets dont la vitesse est représentative des mouvements du milieu d'étude.

surface plane, d'une lumière qui se déplace, d'un drapeau dans le vent, de la propulsion de l'eau, etc.. Pour ce type de tests, le système évalué doit utiliser la plus petite base possible et être assez loin de la scène observée afin de minimiser autant que possible la disparité qui va perturber la comparaison des deux points de vue. Il est conseillé d'utiliser des mires graduées pour aider à l'estimation et d'utiliser des objets dont la vitesse est représentative du milieu d'étude.

6.2. Choix du modèle de capteur

Nous pouvons dresser un constat similaire à celui fait il y a 5 ans pour l'aérien : aujourd'hui, la majorité des systèmes stéréoscopiques sous-marins sont conçus à partir d'appareils photographiques numériques professionnels (Nikon, Canon), souvent reflex.

Les caractéristiques générales de ces appareils numériques, professionnels ou grand public, sont les mêmes que lors de notre précédente étude : ils offrent une très bonne résolution d'image, possèdent une sensibilité correcte et proposent une datation passable (généralement à la seconde, pouvant être améliorée en suivant la technique utilisée sur tri-caméras). Le contrôle électronique de ces systèmes destinés à des utilisateurs humains est toujours difficile et nécessite encore un hack électronique. Quant à la synchronisation, lorsqu'elle est possible, elle s'établit au mieux par un signal électrique qui déclenche les acquisitions et une horloge commune et peut atteindre une précision à quelques centièmes de seconde. Les images sont stockées en interne sur carte SD et il demeure difficile de les récupérer à la volée en quasi temps réel. Il est à noter que ces systèmes sont souvent fortement surdimensionnés en terme de poids et d'encombrement par rapport à la taille de nos micro-robots sous-marins.

Quant aux caméras numériques, leur sensibilité est similaire aux appareils mais elles possèdent une résolution moins élevée (entre 2 et 5 Mégapixels contre 10 à 20 Mégapixels pour les appareils photographiques récents). Elles peuvent en fonction des besoins prendre des images ou des vidéos, en revanche, il est très difficile de dater précisément les images issues d'un flux vidéo et la synchronisation est compliquée car même si le déclenchement est simultané, il se produit souvent un phénomène de dérive au cours de l'acquisition.

Les caméras analogiques font généralement preuve d'une très bonne sensibilité en faible luminosité mais dé-

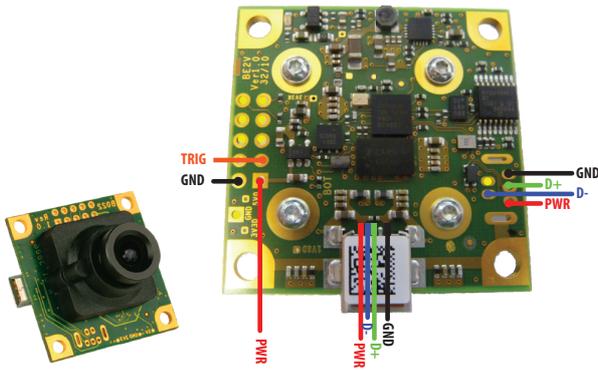


FIGURE 15: Le capteur uEye et le câblage sur sa carte électronique (certains signaux accessibles à plusieurs endroits permettent de répartir les fils dans le milieu étroit qu'est le boîtier étanche).

ne passe rarement les 2 Mégapixels. Une partie de ces capteurs ont la capacité de se synchroniser ligne à ligne durant l'acquisition, mais cela peut poser des problèmes de temps d'acquisition et la scène risque d'avoir changé entre la première et la dernière ligne. De plus, le problème de datation des images issues du flux est le même que pour les caméras numériques. Ces caractéristiques sont généralement partagées par les capteurs imageurs analogiques.

Enfin, la gamme des petits capteurs imageurs numériques, en pleine expansion avec le secteur robotique, offre nativement un grand choix en terme de contrôle, une datation très précise (jusqu'au millième). Leur sensibilité et leur résolution se situe entre celles des caméras analogiques et des appareils photographiques numériques.

Parmi ces différents choix, deux ont retenu notre attention : les caméras GoPro et uEye.

Les caméras GoPro appartiennent à la gamme récente et en pleine expansion des appareils numériques grand public offrant un très bon rapport entre l'encombrement ($61 \times 42 \times 37$ mm, 96 g) et la qualité (capteur CMOS, taille du pixel de $1.65 \mu\text{m}$ en pleine résolution 3840×2880 , soit 11 Mégapixels) par rapport au matériel professionnel (Gintert et al., 2012). Elles proposent une possibilité de synchronisation au centième (câble fourni en accessoire) et une datation à la seconde.

Les uEye sont des caméras numériques professionnelles utilisées dans la communauté robotique : on les retrouve entre autre sur des robots sous-marins comme caméra embarquée (Walters et al., 2013) et dans des projets aériens sur des bancs stéréoscopiques pour réaliser de l'odométrie visuelle (Sanfourche et al., 2013).

Elles présentent une résolution plus petite que les caméras GoPro (capteur CMOS, taille du pixel de $5.3 \mu\text{m}$ en pleine résolution 1280×1024 , soit 1.3 Mégapixels). En revanche, elles offrent une datation précise (un millième de seconde) et peuvent atteindre un bon taux de synchronisation (environ un millième de seconde). Surtout, elles permettent un contrôle logiciel complet de leurs paramètres internes (temps d'exposition, déclenchement,

	Optio A40	GoPro	uEye
Pixel (μm)	1.90	1.65	5.30
Résolution	4000×3000	3840×2880	1280×1024
Datation (s)	1.000 (0.020 avec hack)	1.000	0.001
Synchro. (s)	0.010 (hack)	0.050	0.005
Fréquence (1/s)	(1/1.5)	1/2.0	1/1.0
Contrôle	moyen	faible	total
Déclenchement	hack	timelaps	électronique
Stockage	oui	oui	non
Taille (mm)	$91 \times 56.5 \times 23.5$	$61 \times 42 \times 37$	$36.0 \times 36.0 \times 20.2$
Poids (g)	170	96	16

TABLE 1: Comparatif des 3 capteurs envisagés : les appareils photographiques Pentax Optio A40, les caméras GoPro et les caméras uEye.

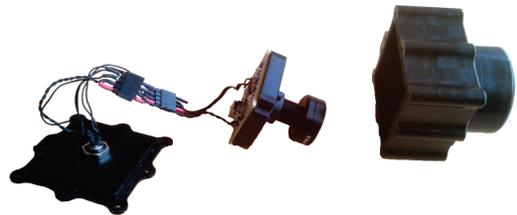


FIGURE 16: La caméra uEye et le boîtier Shockwave étanche à l'immersion, résiné pour pouvoir laisser passer l'optique de la caméra, plus encombrante que les caméras d'origine.

etc.) et une sauvegarde des images dans un format compressé sans perte.

Ces caméras, que l'on peut voir à la figure 15, communiquent via le protocole USB et n'ont pas de capacité de stockage interne, elles nécessitent donc un ordinateur embarqué pour travailler.

L'utilisation synchronisée sous l'eau des caméras GoPro demande un hack électronique (câble personnalisé) et une adaptation mécanique importante (communication entre boîtiers étanches GoPro à ajouter) bien qu'elles puissent être utilisées pour acquérir des couples stéréoscopiques non synchronisés ($\delta t \leq 0.5$ s en mode timelaps). C'est pourquoi nous avons réalisé notre nouveau capteur avec des caméras uEye.

Une comparaison des caractéristiques de ces deux capteurs au regard du capteur précédent (Optio A40) est présentée à la table 1.

6.3. Support et fixation mécanique

Pour permettre une utilisation amphibie, le plus grand défi est l'étanchéité des capteurs et de la connectique de communication. Les caméras uEye ne possèdent pas de boîtiers étanches à l'immersion dédiés, nous avons donc utilisé ceux d'une autre caméra, la caméra analogique Shockwave de Primatec qui possède une taille similaire, étanches à 80 mètres (figure 16). Ces derniers sont équipés d'un connecteur Fischer 7 broches pour passer



FIGURE 17: Le banc stéréoscopique construit à partir des caméras uEye.

les données USB (4 fils) et le signal de déclenchement (1 fil). Parce qu'elles utilisent une communication haut débit, cela implique que les câbles scellés, ainsi que les câbles se trouvant à l'intérieur des caissons étanches, doivent être soigneusement torsadés pour éviter la perte de données par diaphonie.

Dans l'air, un simple caisson de protection en carbone est suffisant, les boîtiers étanches ne feraient qu'alourdir et gêner l'optique. Un câble USB standard branché sur le port mini-USB du capteur permet l'échange des données, le déclenchement électronique pouvant se faire par le biais d'un fil directement soudé sur la carte électronique du capteur.

Nous avons choisi pour ce nouveau capteur de fixer les caméras sur un banc rigide, la mise en place de servomoteur en milieu sous-marin étant compliquée en terme d'étanchéité et d'encombrement (ajout de connecteurs étanches sur le robot). La structure est en profilé aluminium. Ayant retiré la possibilité de prise de vue en "Croix de Malte", il n'est donc pas nécessaire de rajouter une troisième caméra. Nous avons donc un banc binoculaire, présenté à la figure 17, qui peut être fixé sur le châssis soit au nadir pour prendre des images du sol ou des fonds marins, soit en latéral pour étudier les tombants et les objets semi-immergés.

Le choix de la distance séparant les deux caméras (appelée la base B_{mm}) est important car la position relative des images de la paire stéréo a une influence significative sur la qualité de la reconstruction 3D. Il se choisit en cohérence avec des paramètres opérationnels théoriques tels que la distance à la cible ou la vitesse de déplacement.

C'est un compromis entre plusieurs critères. L'équation 9 montre l'erreur de reconstruction en Z (ΔZ) calculée à partir de ρ la somme algébrique proportionnelle de toutes les erreurs possibles (souvent choisie de façon empirique à 0,3 ou 0,6), et la taille de pixel p_{mm} , la hauteur H_{mm} , la focale f_{mm} et la base B_{mm} (Saleh et Scarpace, 2000). Comme cette erreur de reconstruction est inversement proportionnelle à la base, elle a tendance à favoriser une base plus large.

Mais, comme on peut le voir dans l'équation 10, étant donné W_{pix} la largeur de l'image en pixels, une grande base induit un faible recouvrement (O_{prct}) entre les images, ce qui réduit la région utilisable pour des applications de reconstruction 3D. Et cela produit également une aug-

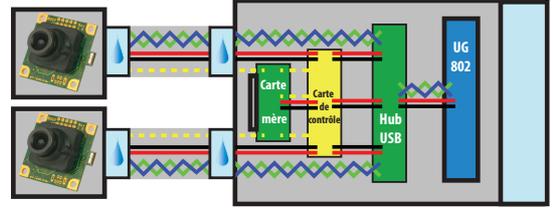


FIGURE 18: Interfaçage des caméras uEye avec le reste du système : câble étanche, carte-mère, carte de contrôle, hub USB, ordinateur embarqué (UG802).

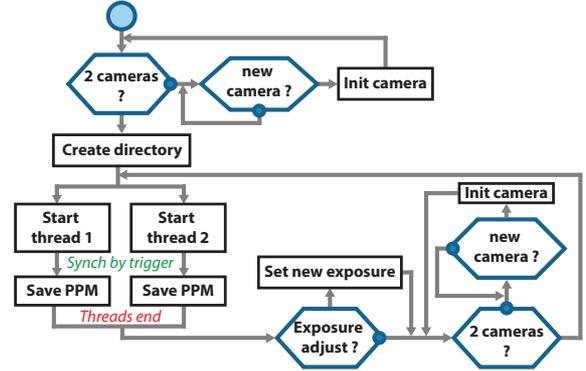


FIGURE 19: Diagramme de l'algorithme d'acquisition des images uEyes sur l'ordinateur embarqué UG802.

mentation de la déformation des objets, du phénomène d'occlusion et des changements de radiométrie (Hullo et al., 2009).

En ce qui concerne la distance à la cible, elle est essentiellement limitée par le choix de la taille de l'échantillon au sol (GSD_{mm}). Conformément à la méthodologie de Réalité Terrain Étendue (Gadamer et al., 2013) et en inversant l'équation 6, on peut facilement calculer la distance maximale acceptable à la cible. Dans notre cas, un GSD de 25 mm est nécessaire pour identifier les objets centimétriques, nous devons donc naviguer à moins de 3 mètres du fond marin.

En considérant un relief assez fort, une base de 7 à 12 centimètres semble un bon compromis. En aérien, la distance à la cible n'est pas limitée liée par la visibilité et pourra donc être plus élevée et une base plus grande peut être envisagée contre un GSD moins important.

La base du banc aluminium est ajustable pour répondre au mieux aux besoins des différentes études.

$$\Delta Z = \rho \times p_{mm} \times \frac{H_{mm}}{f_{mm}} \times \frac{H_{mm}}{B_{mm}} \quad (9)$$

$$O_{prct} = 1 - \frac{B_{mm}}{S_{mm}} = 1 - \frac{B_{mm}}{W_{pix} \times GSD_{mm}} \quad (10)$$

6.4. Interfaçage et électronique de contrôle

En terme d'interfaçage (figure 18), les câbles USB des caméras sont branchés à l'intérieur du robot sur un HUB qui est lui-même connecté à l'ordinateur embarqué s'occupant des tâches de haut niveau. Il s'agit d'une clé multimédia Android sur laquelle nous avons installé un

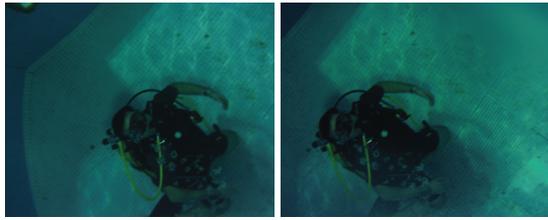


FIGURE 20: Couple stéréoscopique acquis par le banc uEye en piscine.



FIGURE 21: Exemples d'images sous-marines acquises en milieu sous-marin par une caméra uEye.

système d'exploitation GNU / Linux (Picuntu). Il appartient à ces nombreuses unités de calcul qui sont sorties ces dernières années comme l'Overo, la Raspberry Pi, etc.. Toujours plus petites et à des prix très abordables (une à deux fois la taille d'un briquet, < 50 g, < 120 €) elles présentent des performances de plus en plus intéressantes (> 600 MHz, > 256 Mo RAM). Il est important de considérer que ces petits ordinateurs fonctionnent principalement sur l'architecture ARM (pour limiter les consommations énergétiques) ce qui peut mener à des problèmes de pilotes logiciels pour certains matériels.

Le signal de déclenchement de prise de vue est, lui, généré par la carte-mère du robot et est basé sur une horloge. La carte-mère permet également de connecter/déconnecter électroniquement les câbles USB des caméras et l'ordinateur embarqué via une carte de contrôle (interrupteurs sur l'alimentation).

Notre programme d'acquisition, illustré à la figure 19, tient compte de la puissance de calcul réduite des calculateurs embarqués. Pour obtenir le meilleur taux de synchronisation, il utilise un thread pour chaque caméra alors que le dsPIC de la carte mère génère un signal de déclenchement indiquant que l'acquisition suivante doit commencer. Avec un temps d'acquisition constant, on obtient une paire synchronisée avec une précision de 10 millièmes de seconde toutes les secondes ou toutes les deux secondes en fonction de l'éclairage (cette fréquence d'acquisition est limitée par la capacité d'écriture de système embarqué). Le programme est robuste au redémarrage du robot ou à la déconnexion de l'une ou des deux caméras. Tous les réglages automatiques ont été désactivés.

Mais un temps d'exposition fixe peut mener à des images soit surexposées, soit sous-exposées, du fait des variations de luminosité souvent brutales des zones naturelles (nuages, transitions entre les zones d'ombres et les zones ensoleillées, surfaces plus ou moins réfléchissantes, etc.). Pour remédier à cela, nous prenons une



FIGURE 22: Images stéréoscopiques synchronisées acquises par le banc stéréoscopique uEye en fin de journée par vent moyen.

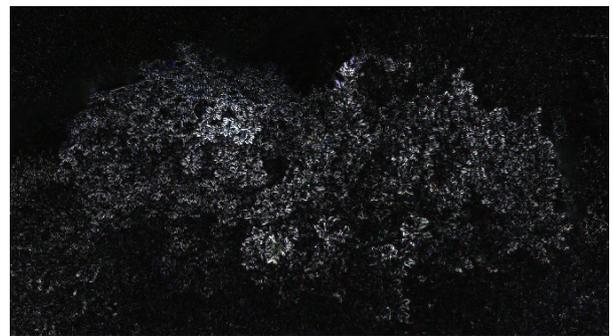


FIGURE 23: Amplitude des mouvements (en blanc) ayant eu lieu sur la scène observée entre deux acquisitions successives.

mesure de l'exposition automatique tous les cinq acquisitions afin d'ajuster notre paramètre d'exposition fixe.

6.5. Analyse des premiers résultats

Le banc stéréoscopique uEye nécessitait plusieurs validations, tant en terme d'étanchéité que de qualité de la synchronisation des images.

Concernant l'étanchéité, nous avons pu valider le bon fonctionnement de notre système (robot et banc stéréoscopique) jusqu'à 15 mètres dans la fosse de plongée de Charenton-Le-Pont, puis jusqu'à 26 mètres lors d'une mission terrain en mer. Le principal problème rencontré concernait l'étanchéité de nos câbles USB confectionnés sur mesure pour relier les boîtiers Shockwave au robot : en effet une légère fuite d'humidité compromettait la communication et rendait les câbles inutilisables. Nous avons pu résoudre ce problème en corrigeant notre protocole d'étanchéification.

Les tests en milieu aquatique nous ont permis d'obtenir un aperçu de la qualité des images aussi bien en eau claire (piscine) qu'en eau de mer. Elles sont pour l'instant très floues à cause d'un problème d'optique, mais ces premiers résultats sont cependant prometteurs. Un couple stéréoscopique pris en piscine est présenté à la figure 20 et un échantillon d'images sous-marines sont visibles à la figure 21.

Afin de valider la synchronisation effective des images, nous avons fait une campagne de mesure aérienne, dont



FIGURE 24: Reconstruction 3D à partir du couple stéréoscopique présenté à la figure 22 en basse résolution (700 × 560).

des échantillons sont présentées à la figure 22. Les acquisitions ont été réalisées en fin de journée en présence d'un vent moyen. Les images sont synchronisées au millièème de seconde avec un temps d'exposition de 1 milliseconde. Nous pouvons voir que les feuilles des gros buissons n'ont pas bougées entre les deux vues, à part la partie haute du buisson qui était très secouée. Quant aux lavandes, beaucoup plus sensibles et mobiles, elles se sont légèrement déplacées mais cet écart ne dépasse pas un ou deux pixels (il est difficile de se prononcer exactement car on est à la limite de la taille d'identification). Pour identifier l'influence du vent durant cette période, nous avons mesuré l'amplitude des déplacements des plantes entre deux acquisitions (environ 1 seconde). On peut observer ces résultats à la figure 23.

Nous avons fait un premier test de reconstruction 3D avec notre chaîne de traitement hybride (adaptée à l'environnement sous-marin aussi bien qu'à l'environnement marin (Avanthey et al., 2013), différente de celle qui a été utilisée à la figure 9 qui était conçue pour le milieu aérien. Les images n'ont été traitées qu'en basse résolution (700 × 560) et nous pouvons observer les premiers résultats à la figure 24 qui sont encore en cours de qualification.

7. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article deux capteurs dédiés à l'acquisition de données à basse-altitude ou in-situ sur des vecteurs légers. Ces capteurs conçus pour respecter les contraintes liées aux milieux naturels, aux besoins des utilisateurs et les contraintes propres à l'utilisation de micro-drones cherchent à faire de l'acquisition de prises de vues simultanées permettant aussi bien de faire des orthophotographies (pour une cartographie de l'usage des sols) que d'extraire des modèles 3D destinés à extraire les paramètres dendrométriques nécessaires aux botanistes.

On peut tirer de l'expérience de la conception de ces deux micro-robots utiles que l'évolution des technologies va vers une miniaturisation toujours croissante mais avec des coûts toujours importants si l'on veut pouvoir garder le contrôle sur les paramètres de prises de vue.

Après quelques difficultés liées aux contraintes d'étanchéification, les premiers résultats de notre nouveau banc stéréoscopique uEye semble désormais prometteurs et nous devrions bientôt pouvoir qualifier la qualité des reconstructions obtenues en aérien et en sous-marins.

Références

- Avanthey, L., Gademer, A., Beaudoin, L., Roux, M., October 2013. First steps for operational dense and high-resolution mapping of shallow water using dedicated robots. Dans : Ocean & Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models & information Systems (OCOSS'13). Nice, France.
- Christ, R. D., Wernli, R. L., 2008. The ROV Manual : A User Guide For Observation Class Remotely Operated Vehicles. Elsevier Science.
- Gademer, A., 2010. Réalité terrain étendue : une nouvelle approche pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l'échelle des individus. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Gademer, A., Beaudoin, L., Avanthey, L., Rudant, J.-P., 2013. Application of the Extended Ground Truth Concept for Risk Anticipation Concerning Exosystems. Radio Science Bulletin 345, 35–50.
- Gintert, B., Gleason, A. C. R., Cantwell, K., Gracias, N., Gonzalez, M., Reid, R. P., July 2012. Third-generation underwater landscape mosaics for coral reef mapping and monitoring. Dans : International Coral Reef Symposium. Cairns, Australia.
- Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., Fares, S., October 2009. Photogrammetry and dense stereo matching approach applied to the documentation of the cultural heritage site of Kilwa (Saudi Arabia). Dans : International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA'09). Kyoto, Japan.
- IFN, 2010. L'image proche infrarouge : une information essentielle. L'IF.
- Mobaied, S., 2011. La dynamique spatiotemporelle de la végétation et l'organisation de la biodiversité des interfaces land-forêt tempérée. Implication pour la gestion conservatoire des réserves naturelles. Thèse de doctorat, Museum National d'Histoire Naturelle.
- Petitpas, B., 2011. Extraction de paramètres bio-geo-physiques de surfaces 3D reconstruites par multi-stéréo-restitution d'images prises sans contraintes. Thèse de doctorat, Télécom ParisTech.
- Petrie, G., Février 2009. Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp. 102–107.
- Saleh, R., Scarpace, F., 2000. Image scanning resolution and surface accuracy; experimental results. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (B2 ; Part 2), 482–485.
- Sanfourche, M., Vittori, V., Le Besnerais, G., November 2013. eVO : a Realtime Embedded Stereo Odometry for MAV Applications. Dans : International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'13). Tokyo, Japan, pp. 2107–2114.
- Shortis, M., Bellman, C., Robson, S., Johnston, G., Johnson, G., 2006. Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Voix, J., 2004. Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.
- Walters, P., Sauder, N., Thompson, M., Voight, F., Gray, A., Schwartz, E. M., 2013. SubjuGator 2013. Rapport technique, AUVSI/ONR.