



Prototypage, analyse et qualification d'une solution de photogrammétrie mobile

■ Guillaume NIEDERBERGER

La photogrammétrie terrestre et statique permet d'effectuer des relevés topographiques de manière rapide et relativement précise. Si l'on ajoute à cela des capteurs tels qu'un GNSS et une centrale inertielle permettant le géoréférencement direct des images, alors on obtient un système de photogrammétrie qui peut s'affranchir de points d'appui. L'avantage d'un tel système est principalement le gain de temps. Ce projet de développement consiste à utiliser une caméra omnidirectionnelle, un GNSS temps réel, une centrale inertielle et un ordinateur de bord. Ce dernier permet de synchroniser les données de navigation et ainsi de garantir une précision des nuages de points de 10 cm en 3D. Le support sur lequel sont fixés tous ces éléments permet une interopérabilité d'utilisations. Il va principalement servir de "backpack", notamment pour effectuer des récolements de réseaux en fouille ouverte en garantissant de la classe A, ou des relevés de corps de rue entrant dans le programme PCRS de l'IGN. Il est aussi possible de réaliser des relevés de cubatures ou d'effectuer des compléments de photogrammétrie aérienne dont il manquerait des données.

■ MOTS-CLÉS

Photogrammétrie mobile, cartographie mobile, positionnement mobile, positionnement 3D, prototypage, programmation.

pour cartographier les forêts brésiliennes. Les résultats prometteurs de ce travail permettent de comprendre quels sont les enjeux à relever pour obtenir des précisions suffisantes pour la topographie. En effet, on s'aperçoit à travers ces résultats que l'utilisation d'une antenne GNSS coûtant moins de 100 € ne permet pas d'obtenir une telle exactitude dans le géoréférencement. La notion de bas coût est subjective, car dans le cas de ce projet, l'antenne GNSS utilisée coûte 1 800 €, ce qui est bien plus élevé qu'une antenne Ublox NEO6M, mais bien inférieur à une antenne Leica ou Trimble de 20 000 €.

L'objectif de ce travail est finalement de réussir à créer un système mobile capable de réaliser de la photogrammétrie automatiquement géoréférencée. Cela signifie de s'affranchir, autant que possible, des points d'appui généralement utilisés pour le géoréférencement. Nous verrons donc dans une première partie la réalisation du prototype, puis dans une deuxième, l'analyse des résultats obtenus avec celui-ci.

Création du système de photogrammétrie mobile

■ Matériel utilisé

Caméra Ricoh Theta Z1

La caméra omnidirectionnelle utilisée pour ce projet est une caméra de la marque Ricoh. Utiliser une telle caméra présente un avantage par rapport à une caméra classique : l'angle de champ est bien supérieur, ce qui permet de photographier intégralement la scène. Cela permet d'acquérir plus de données et d'éviter les oublis sur le terrain.

Le modèle Theta Z1 est le meilleur de la gamme Theta. Son prix est de 1 000 €, elle dispose d'un capteur

Introduction

La photogrammétrie terrestre permet d'effectuer des relevés topographiques de manière rapide et relativement précise. Si l'on ajoute à cela des capteurs permettant le géoréférencement direct des images alors on obtient un système de photogrammétrie qui peut s'affranchir de points d'appui. L'avantage d'un tel système est principalement le gain de temps. Celui-ci n'est cependant pas simple à obtenir, car de nombreux paramètres sont à prendre en considération lors de l'élaboration du prototype.

Les systèmes mobiles et terrestres de cartographie présentent l'avantage de réaliser des relevés précis en un temps restreint. Ils sont généralement utilisés en complément des systèmes aéroportés puisqu'ils permettent de cartographier ce que ces derniers ne peuvent pas voir (les façades par exemple). Les grandes marques de matériel topographique ont vite

compris qu'il s'agissait d'un nouveau marché. Ainsi, plusieurs systèmes sont apparus très rapidement. Parmi eux, on peut citer le *backpack Pegasus* de Leica, la gamme ZEB de Geoslam, la gamme *Heron Lite* de Gexcel ou encore le *backpack Trekker* de Google. Sur chacun de ces appareils sont embarqués une multitude de capteurs tels que : un GNSS, un laser scanner, des appareils photographiques, une centrale inertielle et un ordinateur de bord. L'avantage d'avoir autant d'instruments regroupés en un seul système est que la précision finale sera centimétrique. Néanmoins, ces appareils sont très onéreux, ce qui rend le produit final très peu accessible aux entreprises de géomètres topographes. Quelques récents projets de recherche ont mis en avant l'utilisation de matériel à prix raisonnable (< 5 000 €). On peut citer le travail de [Campos et al., 2018] sur la réalisation d'un backpack utilisant une caméra omnidirectionnelle, un GNSS et une centrale inertielle à bas coûts





CMOS de 1 pouce et de 20Mp ce qui lui permet d'acquérir des images 4K de 3840 x 1920 pixels. La fréquence d'acquisition en mode vidéo est de 30 images par seconde. Le fonctionnement d'une telle caméra se base sur la jonction de deux clichés issus de lentilles *fisheyes* adossées l'une à l'autre. Chacune d'elles forme une image hémisphérique. Ainsi, après fusion des deux images, une image à 360° est obtenue.

L'objectif étant de faire de la photogrammétrie avec la caméra, les images sphériques ne sont pas idéales, car cela ajoute de nombreuses inconnues sur le modèle de projection optique. Or, en photogrammétrie, il est important de connaître le maximum d'informations sur la géométrie des images. La fusion des deux images opère directement après la prise de vue (format .RAW en sortie), il n'est donc pas possible d'obtenir un fichier .jpeg contenant les images brutes (c'est-à-dire deux images *fisheyes*). Cette problématique a contraint l'utilisation de la caméra en mode vidéo. En effet, contrairement aux images, les vidéos ne sont pas automatiquement *stitchées*, ce qui permet de récupérer les images *fisheyes* et non les images sphériques (figure 1). De plus, le traitement des images (qui s'effectue via un micro-logiciel interne à la caméra) dure environ 4 secondes. Cela fixe un laps de temps entre chaque image bien trop important pour une utilisation en mode mobile. La vidéo permet ainsi de pallier ces deux problématiques.



Figure 1. Fichier obtenu en mode vidéo.

Emlid Reach RS2 et Centrale Inertielle Phidget 1044

Pour géoréférencer les images prises par la caméra Ricoh Theta Z1, il est nécessaire d'intégrer une antenne GNSS ainsi qu'une station inertielle. Le choix des instruments a été fait suivant plusieurs critères : la précision, l'encombrement et le prix. Pour le GNSS, c'est l'antenne Emlid Reach RS2 qui a répondu à toutes ces exigences. Elle permet d'effectuer des relevés en NRTK ou RTK ce qui est un élément important pour le projet, car cela évite tout post-traitement des données. La précision fournie par le constructeur est :

RTK	
Horizontal	Vertical
7 mm + 1 ppm	14 mm + 1 ppm

Table 1. Précisions de l'Emlid Reach RS2.
source : www.emlid.com

$\Delta E(m)$	$\Delta N(m)$	$\Delta H(m)$
0.0028	-0.0106	0.0032

Table 2. Résultats de la comparaison Emlid/Leica.

L'antenne GNSS a été testée en comparant les coordonnées obtenues en NRTK moyenné sur trois points avec celles obtenues par une antenne Leica GS18, dont la précision est deux fois meilleure. Les résultats obtenus prouvent que cette antenne est suffisamment fiable pour être utilisée en NRTK. La centrale inertielle est un élément indispensable pour le bon fonctionnement du système. En effet, elle permet d'apporter des données nécessaires au positionnement des caméras dans

l'espace. En ce sens, elle fait partie, avec le GNSS, du système de navigation du produit. Elle a quant à elle été étalonnée via le logiciel du constructeur avant son utilisation. Son prix est de 100 €.

Raspberry Pi 4

Le système doit nécessairement avoir un ordinateur de bord pour pouvoir collecter et fusionner les données des différents appareils présentés précédemment. L'utilisation d'un nano-ordinateur s'est alors imposée. Dans le but de répondre au critère de coût du développement, le Raspberry Pi 4 a été choisi pour cette fonction. En plus d'être peu onéreux, il est très performant (8Go de RAM) et rassemble une large communauté d'utilisateurs.

Ce nano-ordinateur fonctionne grâce à une batterie externe, il consomme très peu d'énergie (5V, 3A), ce qui donne une grande autonomie au système.

■ Étalonnages et programmes d'acquisition et de post-traitement

Programme d'acquisition des données et détermination des constantes

Un aspect très important du projet est l'acquisition des données du GNSS et de l'IMU. Le premier permet d'obtenir une position géographique précise au centimètre avec une fréquence de 1Hz (sous forme de trame NMEA), tandis que l'IMU peut calculer une orientation (lacet, tangage, roulis) avec une fréquence variant de 1Hz à 250Hz. Un programme Python permet de faire le lien entre le GNSS et l'IMU via une connexion Bluetooth pour le GNSS et USB pour la centrale inertielle pour synchroniser les données. Ce dernier point est très important, car plus la synchronisation est précise, plus le résultat final (le géoréférencement du nuage de points) le sera. Le schéma suivant montre les images géoréférencées (rouges) toutes les secondes.

Le choix des méthodes de transmission des données à l'ordinateur de bord a été une problématique importante du projet. Par exemple, le GNSS Emlid Reach RS2 dispose de quatre protocoles de transfert de données (USB-C, Radio, RS-232 et Bluetooth) or, ils ne sont pas tous aussi faciles à intégrer



au Raspberry Pi. Le port USB-C par exemple semblait être le moyen le plus efficace de prime abord, seulement il s'est avéré que la transmission des données fonctionnait, mais que l'antenne activait automatiquement la charge de sa batterie, ce qui causait un dysfonctionnement du Raspberry Pi qui, rappelons-le, est alimenté uniquement par du 5V et 3A.

Celui-ci a été paramétré pour lancer le programme d'acquisition dès son démarrage. Ainsi, les mesures de navigation sont enregistrées en permanence à partir de la mise sous tension de l'ordinateur. La lecture des trames NMEA se fait ensuite automatiquement lors de leur réception, de même pour les données IMU. Elles sont enregistrées directement sur une clé USB branchée à celui-ci. À la fin du levé, deux fichiers sont créés, l'un contient les angles d'orientation et l'autre les coordonnées géographiques de l'antenne.

Ces dernières sont évidemment corrigées d'un bras de levier. En effet, les coordonnées sont calculées par rapport au centre de phase de l'antenne GNSS et non pas au sommet de prise de vue des images (ce qui est souhaité).

Pour cela, il est nécessaire de calculer le vecteur qui sépare le centre de phase de la caméra. Plusieurs techniques sont possibles pour réaliser cela, notamment directe ou indirecte. La mesure directe consiste à mesurer physiquement la différence alors que l'indirecte consiste à l'estimer suivant différentes méthodes. Comme il est difficile de calculer directe-

ment le vecteur (nécessité d'avoir un pied à coulisse très précis), le choix a été fait d'utiliser la méthode indirecte par cibles. Cela nécessite un mur d'étalement constitué d'une quinzaine de points géoréférencés. Des mesures photogrammétriques sont effectuées et des mesures GNSS sont réalisées en parallèle. Après avoir ajusté les caméras en pointant chaque cible manuellement sur un logiciel de photogrammétrie, on obtient les coordonnées des sommets de prise de vue. Par la même occasion, des mesures sont effectuées avec la centrale inertielle ce qui permet de déterminer la rotation entre les systèmes propres à la caméra et à la centrale inertielle. Comme pour le GNSS, il est nécessaire de connaître la rotation entre ces deux systèmes pour pouvoir l'appliquer aux données de l'IMU et ainsi obtenir des images orientées et géoréférencées.

Une fois déterminées avec précision, ces valeurs vont être intégrées automatiquement lors du traitement sur le logiciel de photogrammétrie Metashape.

Logiciel de post-traitement

La phase terrain terminée, le traitement de la vidéo s'effectue via le logiciel sur lequel un programme Python a été implémenté. Le traitement s'effectue selon l'ordre suivant :

Comme nous avons pu le voir, la synchronisation temporelle entre les différents instruments est nécessaire pour obtenir une précision suffisante pour la topographie.

Prenons par exemple un décalage de temps de 0,5 seconde. Si on considère une vitesse de marche de 1,4 m/s, alors l'erreur produite par ce décalage

temporel sera de 0,7 m. Cette erreur n'est certainement pas acceptable pour un usage professionnel du prototype. La problématique a fait l'objet de nombreuses recherches et d'essais, notamment pour réussir à connecter directement la caméra Ricoh Theta au Raspberry Pi. Malheureusement, cela n'a pas pu être effectué faute de temps. Des développements sont en cours pour cette partie.

Il a fallu néanmoins trouver une solution temporaire permettant de synchroniser les images aux données de navigation. Pour effectuer cela, une idée a été de filmer une horloge synchronisée avec le temps de ces données. La trame NMEA fournit le temps GPS à chaque réception, donc il suffisait de filmer une horloge GPS pour ainsi caler les images aux coordonnées et angles. Une montre connectée aux satellites du système GPS a été utilisée pour ceci.

Analyse du prototype

Une des attentes les plus importantes du projet était la précision qu'il est possible d'obtenir avec le système de photogrammétrie. En effet, obtenir des données quant à la précision du système constitue l'ultime objectif du développement. Pour cela, une scène identique à un chantier classique de plan de corps de rue a été utilisée. Une quinzaine de points de contrôle ont été calculés par tachéométrie dans le but de contrôler la qualité du géoréférencement du nuage de points. La zone à lever mesure environ 80 m, les points sont répartis de manière homogène tout le long du parcours effectué. Ainsi, grâce aux 14 points de contrôle répartis sur l'ensemble de la zone, on peut facilement déterminer la précision du géoréférencement. Sans utiliser aucun point d'appui, on obtient un écart moyen quadratique de 0,104 m en trois dimensions, ce qui est assez satisfaisant pour un premier prototype. En effet, cela permet d'effectuer un relevé en





classe A (suivant la réforme DT-DICT). Il faut toutefois rester vigilant car il s'agit d'un cas idéal où la couverture GNSS est bonne tout le long du trajet. Il faut donc par précaution utiliser quelques points d'appui pour assurer un relevé suffisamment précis.

La qualité des nuages de points est quant à elle variable suivant l'exposition de la scène. En effet, un environnement trop sombre engendre souvent une mauvaise reconstruction 3D tout comme une surexposition. Un défaut des lentilles *fisheyes* est qu'elles sont souvent gênées par la présence du soleil (effet de contre-jour marqué) ce qui rend parfois la reconstruction délicate. Néanmoins, les tests réalisés sur des luminaires publics montrent qu'il est possible de les cartographier, car on distingue suffisamment les éléments importants (pied, sommet, câble).

Une étude sur les ressources matérielles et humaines mises en œuvre avec ce prototype a été faite. En comparaison avec une mission topographique "classique", on retrouve des ressources matérielles similaires ; les besoins humains sont quant à eux limités à une seule personne puisqu'une intervention ne nécessite pas d'opérateur ou technicien supplémentaire si ce n'est que l'intervenant. La vitesse de levé est très rapide avec le prototype, car elle est comparable à une vitesse de marche classique. On peut donc imaginer pouvoir effectuer des relevés de grande ampleur en un court laps de temps.

Conclusion

Ce mémoire porte sur la réalisation d'un prototype de photogrammétrie mobile composé d'une caméra 360. Des expérimentations ont été effectuées sur le système dans le but de qualifier la pertinence de son utilisation pour des travaux tels que le récolement réseaux, la détection de lignes aériennes ou le calcul de cubatures. La première étape de l'étude consistait à étudier indépendamment chaque instrument de mesure : la caméra 360, le GNSS NRTK et la centrale inertielle. Ce travail a notamment permis de qualifier la qualité des mesures de navigation (GNSS et IMU) et de calibrer la caméra 360.

Suite à cela, une phase de développement du support a été mise en place dans le but de respecter des critères de légèreté, de maniabilité et de solidité. Le résultat obtenu est plutôt satisfaisant pour l'usage actuel du prototype. Il fera bien évidemment l'objet de développements futurs, notamment pour accroître son interopérabilité.

L'intégration des données a constitué une tâche relativement longue dans le projet, car il s'agissait de créer un algorithme permettant de fusionner deux types de données : des données de navigation (GNSS et IMU) et de cartographie (vidéos 360). Le travail a été axé principalement sur l'intégration des données de navigation tandis que les vidéos fournies par la caméra ont été traitées de manière séparée. Cela est dû à un manque de temps pour finaliser un algorithme aussi complet. Néanmoins, le système fonctionne avec cette méthode. Des améliorations seront apportées au programme d'acquisition de données dans les mois prochains, notamment pour accroître le nombre de données issues de la centrale inertielle, d'améliorer la précision de la synchronisation entre les données GNSS et IMU ou encore d'apporter une précision supplémentaire au temps UTC (milliseconde).

Un des avantages du système est qu'il est entièrement mobile. Cela est possible grâce à l'ajout d'un Raspberry Pi 4 faisant office d'ordinateur de bord. Une partie du travail a consisté à paramétrer cet ordinateur de bord pour qu'il puisse fonctionner en autonomie ; c'est-à-dire en alimentation et en fonctionnement. Cet ordinateur puissant et peu onéreux a été la pierre angulaire du projet. Enfin, une étude qualitative du système a été effectuée ce qui a permis de définir la précision sur les nuages de points de quelques centimètres. Cela est encourageant, notamment du fait que les précisions sont assez proches de celles obtenues par les systèmes vendus dans le commerce et dont les prix sont vingt à trente fois plus élevés. Finalement, ce travail de développement aura permis de créer un prototype utilisable avec très peu de points d'appui ce qui réduit le temps passé sur le terrain. Les évolutions technologiques

futures permettront certainement de pallier le problème de latence entre les images sphériques (4 à 8 s) ce qui évitera par la suite, d'utiliser la vidéo et donc de perdre en qualité d'image. Si les photos peuvent être prises avec un intervalle de temps inférieur à une seconde alors la photogrammétrie sera grandement améliorée, ce qui impactera directement la précision relative des nuages de points. Le prototype de photogrammétrie mobile représente donc une solution intéressante pour l'entreprise GeoProcess et pourra être utilisée en complément des autres instruments de mesure. Il permet d'acquérir de nombreuses données géoréférencées, et ce en un temps restreint. Un des objectifs serait de pouvoir utiliser ce système dans différentes configurations et différents transports : pédestre, mobilité douce (vélo ou trottinette) et voiture. ●

Contact

Guillaume Niederberger

guillaume-niederberger@outlook.fr

ABSTRACT

The terrestrial and static photogrammetry allows to carry out topographic surveys in a fast and relatively precise way. If we add to this GNSS and inertial sensors allowing direct georeferencing of the images, we obtain a photogrammetry system that can do without support points. The advantage of such a system is mainly the time saving. This development project consists in using an omnidirectional camera, a real time GNSS, an inertial unit and an onboard computer. The latter allows to synchronize the navigation data and thus to guarantee a precision of the point clouds of 10cm in 3D. The support on which all these elements are fixed allows an interoperability of uses. It will mainly be used as a "backpack", in particular to carry out surveys of networks in open excavation guaranteeing class A, or surveys of street bodies entering the PCRS program of the IGN. It is also possible to carry out surveys of cubatures or to carry out complements of aerial photogrammetry of which it would miss data.