



Levés de bâti par drones dans un contexte post-sismique

V. BAIOCCHI, M.V. MILONE, M. MORMILE

DICEA - GÉODÉSIE & GÉOMATIQUE, UNIVERSITÉ DE ROME « LA SAPIENZA »,
Via EUDOSSIANA, 18-ZIP, I-00184 ROME

VALERIO.BAIOCCHI@UNIROMA1.IT

D. DOMINICI

DÉPARTEMENT ARCHITECTURE & URBANISME, UNIVERSITÉ DE L'AQUILA,
Via GRONCHI 18, I-67000 L'AQUILA

DONATELLA.DOMINICI@UNIVAQ.IT

Le tremblement de terre de l'Aquila, survenu le 6 avril 2009, d'une magnitude de 6,3, a tué plus de trois cents personnes et provoqué des dégâts considérables : environ dix mille bâtiments, y compris au centre historique, ont été partiellement ou totalement détruits. Les mesures d'urgence ayant enfin pris fin, un travail de fond a été entrepris pour évaluer plus précisément les dégâts sur les structures. Si les techniques GNSS fournissent des résultats de plus en plus précis, leur cadre d'utilisation ne s'adapte que mal à l'examen des façades ou des toits d'immeubles élevés, où au relevé dans des zones dangereuses. C'est pourquoi nous examinons dans cet article la viabilité des drones pour réaliser des prises de vue stéréoscopiques/photogrammétriques de précision afin de palier tous les inconvénients des levés GPS. Nous avons conçu un logiciel de programmation des plans de vol, afin d'optimiser les prises de vue compte tenu des faibles autonomies des drones civils.

elle même partie de la fracture de huit cents kilomètres qui parcourt le massif montagneux et passe sous quelques unes des villes italiennes les plus spectaculaires. En raison de la localisation urbaine de l'épicentre, le séisme a touché de nombreuses bâtisses historiques, dont la construction remontait à la Renaissance ou l'époque baroque, en particuliers des églises et des palais ou hôtels particuliers.

Les travaux de première urgence ont pris des mois pour se réaliser ; force est de constater qu'après leur achèvement, quasiment tout reste encore à faire. Un relevé extensif des bâtiments endommagés, à l'aide d'instruments topographiques, comme des stations totales, des appareils de photogrammétrie rapprochée ou des scanners laser est en cours. Quoique ces appareils remplissent parfaitement leur mission, ils atteignent souvent leurs limites : la plupart des difficultés rencontrées s'expliquent par des soucis d'accessibilité, extérieure ou intérieure, une contrainte typique

Introduction

Le tremblement de terre qui a secoué la zone de l'Aquila, en plein cœur des Abruzzes, en avril 2009 a provoqué la mort de centaines d'habitants, en a jeté des milliers à la rue et a sérieusement endommagé le centre historique de la ville, qui en constituait le pôle culturel et économique. La secousse principale, survenue précisément à 1:32 GMT le 6 avril, a été mesurée

à 5,8 sur l'échelle de Richter, soit 6,3 sur l'échelle des moments. L'épicentre se situant à proximité immédiate de l'Aquila, la capitale des Abruzzes et sa banlieue ont été les plus durement touchées, mais les dégâts s'étendent selon une ellipse de quinze kilomètres sur cinq, allongée dans l'axe de la chaîne des Apennins. D'après l'Institut italien de géophysique et volcanologie, ce séisme résulte d'un mouvement perpendiculaire à une faille locale orientée NO-SE,

des situations post-sismiques. D'autres techniques, comme la photogrammétrie aérienne, sont sûrement moins périlleuses, mais produisent, dans la plupart des cas, des données trop grossières ou inexactes pour être utilisées dans des missions de ce genre.

En revanche, l'utilisation dans ce contexte de micro-drones (ou juste « *drones* ») pour réaliser les levés permet de palier de nombreux inconvénients (Eisenbeiss et al., 2010). Par exemple, les drones accèdent quasiment à tous les sites, en raison de leur agilité importante (Eyanrd et al., 2010). Ces appareils étant totalement ou presque totalement télécommandés, les opérateurs peuvent demeurer tranquillement hors des zones à risque. Il faut bien voir que les opérations de rénovation conduites sur des bâtiments historiques doivent remettre en état les portions endommagées sans toucher – autant que faire se peut – à celles qui sont demeurées intactes. La rédaction de l'échéancier des travaux constitue donc un casse-tête qui nécessite, pour être résolu, de disposer de données extensives et tridimensionnelles sur toute la zone d'intervention. Les parties basses pourraient, à la rigueur, être acquises à l'aide de scanners laser placés au sol, mais ces derniers ne capturent pas les toits. Le drone ne souffre pas de ces limitations et offre, pour sa part, la possibilité d'explorer le bâtiment sous toutes ses coutures, voire même de pénétrer à l'intérieur dans certains cas particuliers. Le vol à très basse altitude, ainsi que la possibilité de pouvoir enchaîner plusieurs missions dans un temps très court, donnent des résultats très précis à des coûts compétitifs.

Le logiciel UP23d

La rédaction du plan de vol constitue une étape critique, car ce dernier peut avoir de profondes répercussions sur les résultats (Hrabar, 2008) : l'exploitation photogrammétrique de haute précision requiert un nombre élevé de clichés géométriquement corrects. (Ioannis et al., 2003). Pour garantir une précision acceptable, toutes les acquisitions doivent demeurer homogènes, ce qui signifie une géométrie constante, une assiette stable et le respect des entraxes (Myungsoo, 2008). Si on se base sur les pratiques courantes de la photographie aérienne classique, un vol se compose de plusieurs passes où l'avion suit une trajectoire (quasi-)rectiligne, les photos étant prises à intervalle régulier ; l'ensemble de la zone couverte lors d'une passe est appelée une « *fauchée* » (figure 1) ; les axes des différentes passes sont calculés pour assurer un certain recouvrement entre les fauchées, de façon à faciliter la rectification lors des post-traitements. En général, la plupart des campagnes demandent un recouvrement axial de l'ordre de soixante à quatre-vingts pour-cent, et latéral de l'ordre de dix à trente pour-cent – ce qui est considéré comme suffisant pour les besoins de la stéréoscopie (Kraus, 1994).

La conception des plans de vol ressortit majoritairement à l'expérience des opérateurs chevronnés ; nous avons donc cherché à concevoir un logiciel qui puisse calculer des trajectoires optimales pour les drones standard, tout en évaluant sa pertinence pour les drones mult rotor équipés d'appareils photos grand public ou semi-métriques (Barazzeti et al., 2011). Dans l'idéal, nous ne souhaitons réaliser

que les clichés nécessaires à la restitution stéréoscopique, et eux seuls, laquelle servira ensuite à calculer la géométrie des bâtiments et donc la constitution d'un modèle numérique d'élévation (Chiabrando et al., 2011).

Les premières expériences ont montré que dans des zones fortement urbanisées, comme le centre historique de l'Aquila, les drones volant à moyenne altitude étaient victimes d'instabilités récurrentes, probablement liées à des effets aérodynamiques. Actuellement, ce problème est minimisé en prenant trois (ou plus) clichés simultanés, mais il ne s'agit que d'un pis aller. Nous avons remarqué que ces soucis disparaissent quand la hauteur de vol décroît, comme si les bâtiments élevés protégeaient le drone de ces effets. Malheureusement, qui dit vol rasant dit également champ de vision réduit, donc obligation de réaliser un plus grand nombre d'acquisitions. Le logiciel spécialisé *UP23d (UAV planner to 3d acquisitions)* a été conçu pour prendre en compte tous ces paramètres et calculer une trajectoire aussi optimisée que possible, avec application aux micro-drones, qui semblent les plus polyvalents et ergonomiques dans le cadre d'une opération post-sismique.

Le logiciel prend en entrée la géométrie de la zone à explorer (forme, aire, position), les caractéristiques optiques de l'appareil photo aéroporté, ainsi que l'échelle désirée au final. Moyennant tous ces paramètres, un algorithme estime une hauteur de vol adéquate, que l'utilisateur peut modifier à sa

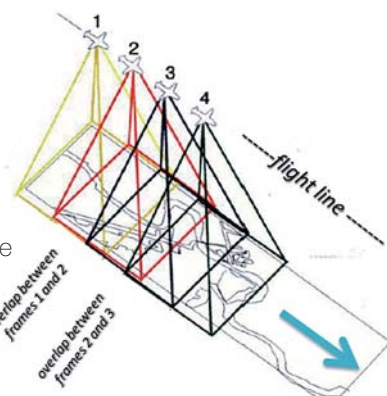


Figure 1 : Déroulement de la prise de vue lors d'une mission classique de photographie aérienne.

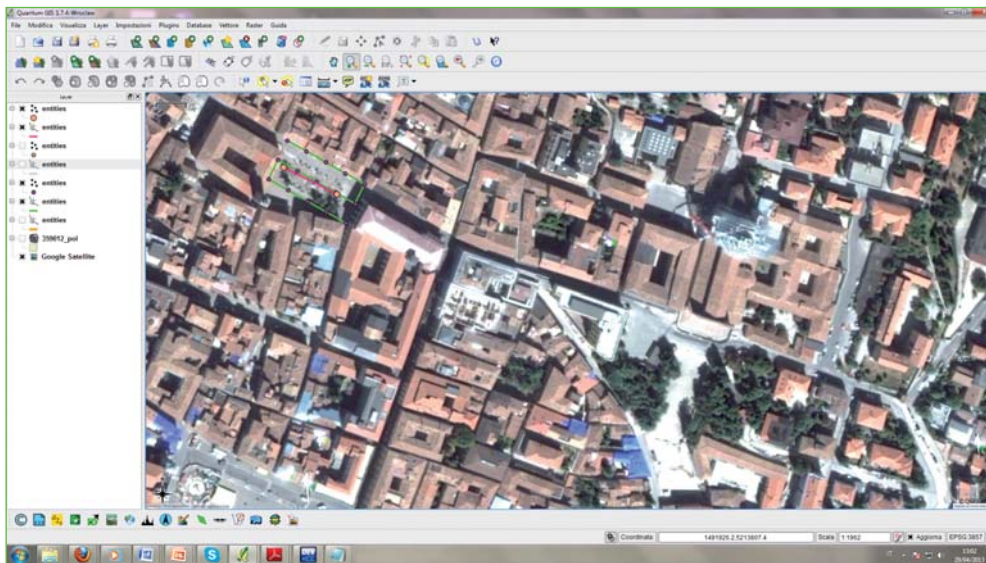


Figure 2 : Visualisation du plan de vol (rouge, vert, points oranges) sur une orthophotographie standard dans le logiciel QGIS.

guise, par exemple s'il veut tenir compte d'un obstacle potentiel. Une fois l'altitude de croisière fixée, le logiciel calcule l'échelle des clichés (moyennant des hypothèses classiques en prise de vue aérienne), puis demande à l'utilisateur de spécifier les taux de recouvrement axial et latéral, ce qui permet de définir le nombre de clichés à réaliser. Enfin, le logiciel détermine la trajectoire du mobile. En sortie, on obtient les coordonnées de chaque « station » ainsi qu'un fichier vectoriel représentant les emprises des photographies correspondantes ; une trace contenant les calculs intermédiaires peut également être fournie. Ces fichiers vectoriels sont intégrables dans un logiciel SIG classique, par exemple QGIS, où ils peuvent être superposés à des orthophotographies classiques, voire à des cartes numérisées. La figure 2 représente, en rouge, la trajectoire de vol et les stations calculées lors de l'acquisition de la Piazza del Palazzo, au centre-ville de l'Aquila. En vert apparaît le vol réalisé manuellement par un opérateur. Comme on peut le constater, le plan de vol élaboré par le logiciel ne comporte que

deux prises de vue, au lieu des quinze effectuées en mode manuel. Ces quinze clichés, sur une surface de 60 x 40 m, semblent surnuméraires, particulièrement si l'on tient compte de la faible autonomie des drones. Dans un contexte post-sismique, les drones sont également employés pour réaliser

de l'acquisition rapprochée des façades, missions pour lesquelles UP23d possède un mode dédié, qui produit des résultats différents (figure 3).

Étude de cas

Pour valider notre approche, nous avons conduit une mission pilote sur un monument bien particulier et parfaitement accessible : la Basilique Sainte-Marie de Collemaggio, une des églises majeures de l'Aquila ; construite en 1287 par Pietro da Morrone, elle est inscrite au patrimoine mondial de l'Humanité (Unesco), car c'est la première à comporter une porte sacrée. Son architecture mêle des éléments romans à des ajouts gothiques et baroques. Le bâtiment a été durement touché par le séisme, puisqu'une partie de la voûte s'est effondrée, provoquant la destruction de la partie finale de la nef.

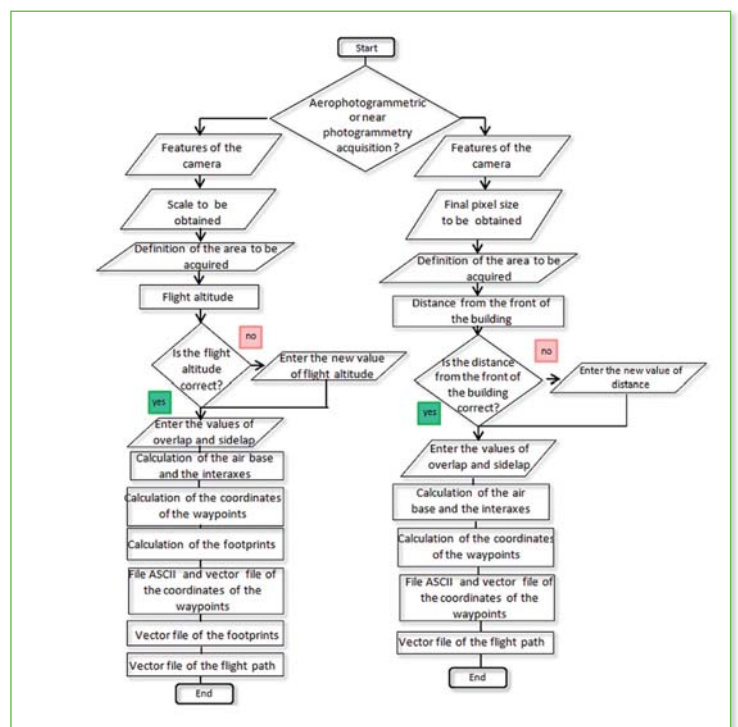


Figure 3 : Organigramme de fonctionnement du logiciel UP23d.



©Crédit Wikipédia/Stemonitis

Figure 4 : La basilique Sainte-Marie du Collemaggio.



Figure 5 : Le drone *Anteos Mini* en cours d'acquisition.

L'expérience a été menée conjointement par la faculté d'ingénierie de l'université de l'Aquila, son équivalent à l'université de Rome « *La sapienza* » et la société privée *Aermatica* qui a gentiment prêté un produit *Anteos A2-mini/b* (figure 5) équipé de tous les capteurs possibles, à savoir un appareil photo commercial *Canon S100* muni d'une optique zoom de focale 5,2 – 26 mm (soit 24 – 120 mm en termes d'appareil reflex), une caméra infrarouge *Flir Tau 320*, un GPS de navigation pour permettre le vol autonome ainsi que l'électronique de télémétrie. *Anteos* est un drone de type « *mini* », quadricoptère (quatre rotors), dont l'assiette est ajustable globale-

ment, et dont la charge utile peut aller jusqu'à vingt kilos. Le produit que nous avons utilisé possède les caractéristiques suivantes :

Caractéristique	Valeur
Structure	Fibre de carbone moulée
Dimensions hors-tout	1,25 × 1,25 × 0,55 (m)
Charge utile	2 kg
Autonomie	25 mn
Fonctions automatiques	Décollage, vol (stationnaire), atterrissage et procédures de sécurité
Navigation	GPS + centrale inertielle
Mode de pilotage	Manuel et automatique
Vitesse effective	25 km•h ⁻¹
Altitude maximale de vol	50 m (maximum réglementaire)
Portée maximale	200 m (maximum réglementaire)
Moteurs	Sans balais
Batteries	Lithium-Polymère

Table 6 : Caractéristiques du drone *Anteos Mini*.

Évaluation du plan de vol automatisé

Pour évaluer les performances du logiciel, nous avons comparé le plan de vol issu de ce dernier avec un équivalent conçu par l'opérateur habituel du drone. Pour que la comparaison soit sensée, nous avons entré dans le logiciel les mêmes paramètres que ceux utilisés lors du vol manuel. Le résultat (figure 7) comporte un certain nombre de stations (en coordonnées WGS84/UTM) dont l'altitude varie, de sorte à réaliser le taux de recouvrement désiré. La figure 8 montre la différence entre les stations calculées (rouge) et celles effectivement réalisées (en bleu clair). Il ressort clairement que nombre de stations effectuées par l'opérateur sont redondantes, ceci correspondant à une pratique courante de nos jours.

Pour simuler l'acquisition planifiée par notre logiciel, nous avons cherché dans la multitude de paires stéréoscopiques à notre disposition celles qui se rapprochaient le plus de nos stations théoriques (figure 9). La figure 9 montre deux acquisitions

EST	NORD	FLIGHT ALTITUDE
368528.4454	4689099.3907	4.0000
368526.0804	4689092.4763	4.0000
368523.7154	4689085.5619	4.0000
368521.3504	4689078.6474	4.0000
368518.9855	4689071.7330	4.0000
368516.6205	4689064.8186	4.0000
368516.6205	4689064.8186	9.0000
368518.9855	4689071.7330	9.0000
368521.3504	4689078.6474	9.0000
368523.7154	4689085.5619	9.0000
368526.0804	4689092.4763	9.0000
368528.4454	4689099.3907	9.0000
368528.4454	4689099.3907	15.0000
368526.0804	4689092.4763	15.0000
368523.7154	4689085.5619	15.0000
368521.3504	4689078.6474	15.0000
368518.9855	4689071.7330	15.0000
368516.6205	4689064.8186	15.0000
368516.6205	4689064.8186	20.0000
368518.9855	4689071.7330	20.0000
368521.3504	4689078.6474	20.0000
368523.7154	4689085.5619	20.0000
368526.0804	4689092.4763	20.0000
368528.4454	4689099.3907	20.0000
368528.4454	4689099.3907	26.0000
368526.0804	4689092.4763	26.0000
368523.7154	4689085.5619	26.0000
368521.3504	4689078.6474	26.0000
368518.9855	4689071.7330	26.0000
368516.6205	4689064.8186	26.0000

Figure 7 : Listing de quelques unes des stations calculées par le logiciel UP23d.



Figure 8 : Comparaison du plan de vol manuel (en bleu) et calculé automatiquement (en rouge).

géométriquement semblables à la paire stéréoscopique calculée par le logiciel ; elles ont été prises à deux altitudes légèrement différentes, 18,9 et 18 mètres respectivement, mais cette différence n'est pas pénalisante dans la mesure où la précision altimétrique du couple GPS + centrale inertielle n'est pas métrique. Des tests d'extraction du modèle numérique sont actuellement en cours, mais les premiers résultats, visibles sur la figure 10, paraissent encourageants :

un examen de détail montre une précision à peu près décimétrique, voire centimétrique en certains endroits. Les voûtes, niches et sculptures du portail sont visibles, ainsi que la structure de la rosace.

Pour évaluer la précision du modèle extrait, nous avons réalisé une acquisition au scanner laser, puis réalisé une comparaison entre les nuages de points, en se restreignant à un échantillon composé de 3 903 mesures. Le résultat apparaît sous forme d'histogramme dans la figure 11, ce dernier variant de - 1 à 1 m par pas de vingt centimètres. On distingue facilement que la classe la plus peuplée correspond à la tranche comprise entre vingt et quarante centimètres, ce qui suggère la présence d'un systématisme. Pour essayer de comprendre les raisons de celui-ci, nous avons projeté les points échantillons sur une représentation de la façade (figure 12). Il en ressort que les plus grandes

erreurs se concentrent en des endroits précis, sans qu'il soit encore possible d'isoler une cause plausible à cette répartition (problèmes d'exposition ?).

Conclusion et perspectives

Les quelques tests qui ont pu être menés jusqu'à présent montrent que la précision obtenue par la mission automatique drone sont comparables à ceux que fournissent d'autres techniques plus rodées. Les erreurs les plus manifestes se concentrent dans certaines zones, qui font l'objet d'études plus poussées pour essayer de comprendre en quoi elles interfèrent avec la mesure. Quoi qu'il en soit, vu l'extrême souplesse conférée par l'usage des drones, ce dernier semble parfaitement adapté à l'auscultation du bâti en contexte post-sismique. Nous sommes également satisfaits des performances du logiciel de conception



Figure 9 : Paires stéréoscopiques quasi-équivalentes à celles calculées par le logiciel.

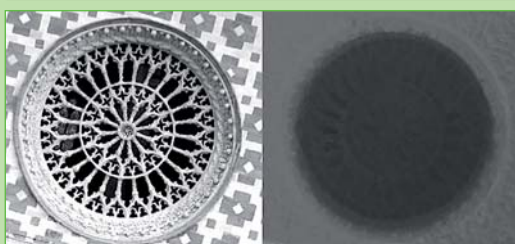
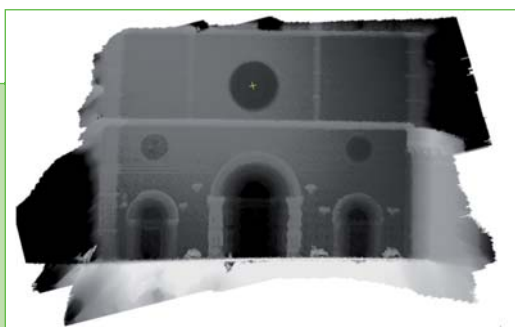


Figure 10 : Détail architecture et rendu hypsométrique réalisé à partir des acquisitions.

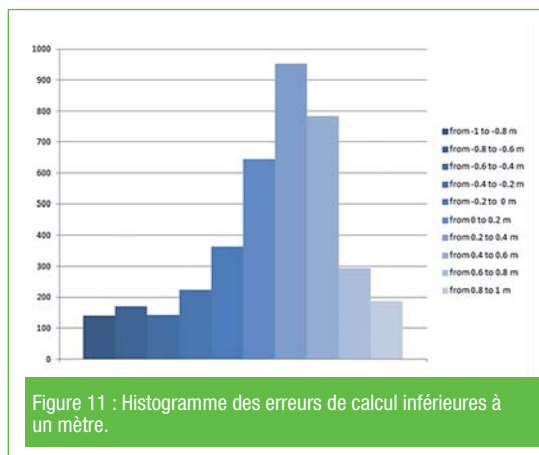


Figure 11 : Histogramme des erreurs de calcul inférieures à un mètre.

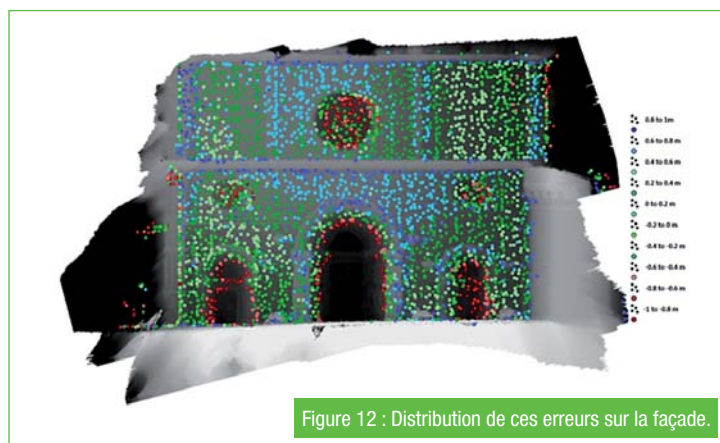


Figure 12 : Distribution de ces erreurs sur la façade.

automatique de plan de vol que nous avons conçu.

Les limites de l'acquisition par drone résident essentiellement dans l'imprécision du positionnement GPS + centrale inertielle, ainsi qu'une incertitude dans l'acquisition elle-même due aux instabilités transitoires de l'appareil. Nous pensons que l'utilisation des plans de vol optimisés issus de notre logiciel permettra de prolonger l'autonomie du drone, et ainsi d'explorer en un seul vol des zones sensiblement plus étendues.

Remerciements

Les auteurs remercient la société *Aermatica* pour le prêt du drone qui a permis la réalisation de ce test. |

Références

- Barazzetti L., Nex F., Remondino F., Sarazzi D., Scaioni M. : « UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives ». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g, Conference on unmanned aerial vehicle in geomatics, Zurich, Suisse, 2011.
- Chiabrando F., Nex F., Piatti D., Rinaudo F. : « UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy) ». *Journal of Archaeological Science* 38 697e710 (2011).
- Eisenbeiss H., Haarbrink R. B. : « Accurate DSM production from unmanned helicopter systems ». *ISPRS Technical Commission VII Symposium – 100 Years ISPRS Advancing Remote Sensing Science*, Vienne, Autriche (2010).
- Eynard D., Vasseur P., Demonceaux C., Fremont V. : « UAV Altitude Estimation by Mixed Stereoscopic Vision ». *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan.
- Hrabar S. : « 3D Path Planning and Stereo-based Obstacle Avoidance for Rotorcraft UAVs ». *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice.
- Ioannis K. Nikolos, Kimon P. Valavanis, Nikos C. Tsourveloudis, Anargyros N. Kostaras : « Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation ». *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part b: cybernetics*, vol. 33, no. 6, (2003).
- Myungsoo Jun : « Path planning for unmanned aerial vehicles in uncertain and adversarial environments ». In *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms*, edited by S. Butenko, R. Murphey, and P. Pardalos (2008).