

طريقة البنية انطلاقاً من الحركة كحل بديل للمسح الليزري في النمذجة ثلاثية الأبعاد

د. عمر الخليل*

د. منير يحيى**

محمد دوه جي***

(تاريخ الإيداع 6 / 11 / 2016. قُبِلَ للنشر في 7 / 3 / 2017)

□ ملخص □

تتطلب النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر بيانات ذات كلفة عالية وذلك في العديد من مجالات التطبيق (مثل توثيق المنشآت واللقى الأثرية). وعادةً ما يتم الحصول على هذه البيانات باستخدام المساحات الليزرية ثلاثية الأبعاد والتي تعتبر غالية الثمن، ثقيلة الوزن وتحتاج إلى خبرة لاستخدامها. سنناقش في هذا البحث الخطوط العريضة لتقنية المسح التصويري الحديثة وسهلة الاستخدام والتي تستخدم في الحصول على بيانات تفصيلية ضمن حدود مقاييس متعددة. هذه التقنية معروفة باسم البنية انطلاقاً من الحركة (SfM) 'Structure-from-Motion'. تتطلب طرائق المسح التصويري البرمجي التقليدية معرفة موقع وتوجيه آلة التصوير أو مجموعة من نقاط الضبط ثلاثية الأبعاد وذلك لتسهيل تثلث المشهد Triangulation المصور وإعادة بنائه. وعلى النقيض من ذلك، تؤمن طريقة الـ SfM حساب مواقع وتوجيه آلة التصوير وهندسية المشهد المصور في آن واحد وبشكل آلي وذلك باستخدام طريقة الحزم Bundle adjustment القائمة على ربط السمات المتشابهة في صور متداخلة للعنصر.

سيتم في هذا البحث القيام بتقديم شامل لهذه التقنية. سنقوم لاحقاً بإعطاء أمثلة تطبيقية للـ SfM في الحصول على النماذج ثلاثي الأبعاد لغرض الإظهار (نمذجة حافلة لنقل الركاب) أو التوثيق المتري لمنشآت أثرية. المنشآت الأولى هو واجهة الجامع العمري الأثري في مدينة بصرى الشام والذي سنستخدم لنمذجته صوراً قديمة لا تحقق بالعموم اشتراطات استخدام طريقة البنية انطلاقاً من الحركة. أما المنشآت الثانية فهو واجهة قلعة موجودة في مدينة سترازبورغ الفرنسية وسنستخدم لنمذجته صوراً تحقق اشتراطات استخدام طريقة البنية انطلاقاً من الحركة. وللحكم على دقة نتائج التوثيق، تم استخدام مسافات اختبار ونقاط ضبط مقاسة على هذه الواجهات.

الكلمات المفتاحية: البنية انطلاقاً من الحركة، غمامة النقاط، نمذجة ثلاثية الأبعاد، معايرة آلة التصوير.

* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

** أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

*** طالب ماجستير - قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Structure from Motion (SfM) method as an alternative solution to laser scanning in 3D modeling

Dr. Omar Al Khalil^{*}
Dr. Mouneer Yahia^{**}
Mohammad Dowajy^{***}

(Received 6 / 11 / 2016. Accepted 7 / 3 / 2017)

□ ABSTRACT □

3D modelling of objects requires high costs of data collection in many applications (as culture heritage and archaeological finds documentation). Data acquisition is often achieved by using 3D laser scanners which are complicated by the high weight, capital investment cost and knowledge.

In the present study, we discuss the outlines of low-cost, user-friendly photogrammetric technique for obtaining high-resolution datasets at a range of scales. This technique is termed 'Structure-from-Motion' (SfM). Traditional softcopy photogrammetric methods require the 3-D location and pose of the camera(s), or the 3-D location of ground control points to be known to facilitate scene triangulation and reconstruction. In contrast, the SfM method solves the camera pose and scene geometry simultaneously and automatically, using a highly bundle adjustment based on matching features in multiple overlapping images of the object.

In this study, a comprehensive introduction to the technique of SfM is presented. Practical applications of using SfM in 3D modelling for visualization purpose (modelling of a bus) or metric documentation purpose of historical monuments are then given. The first monument is the façade of the Omari mosque in Bousar-El Sham city (by the use of old photos that don't meet, generally, the requirements of SfM method). The second monument is the façade of Strasbourg castle (by the use of old photos that meet the requirements of SfM method). To evaluate the quality of documentation results, check distances and control points measured on the façades were used.

Key words: Structure-from-Motion, Points cloud, 3D modeling, Camera calibration.

* Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

***Postgraduate Student, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة

لقد شهد العقد الماضي ثورةً تقنية في مجال العلوم المساحية والتي ساهمت في التحول الكبير في طرائق النمذجة ثلاثية الأبعاد. هذا، وتعتبر المساحات الليزرية ثلاثية الأبعاد من أهم وأدق هذه التقنيات، فهي تمكننا من القياس السريع لعدد كبير من النقاط ثلاثية الأبعاد (غمامة نقاط Points cloud) الواقعة على سطوح العناصر وهذا ما يعتبر مناسباً جداً في تطبيقات عديدة منها توثيق عناصر التراث المعماري كالأبنية، الخرائب Ruins والمنحوتات Sculptures والتي تتميز بالتعقيد الهندسي لسطوحها (Rosser, N.J., et al., 2005). لكن هنالك مجموعة من المشاكل التي تعاني منها المساحات وهي:

1. ضخامة حجم أجهزة المسح الليزري.
 2. صعوبة الاستخدام خاصة عند الحاجة إلى تجميع البيانات المتعلقة بالعناصر ذات المناسيب المرتفعة بالنسبة للأرض. وهذا ما يسبب نقصاً في البيانات الخاصة ببعض أجزاء العناصر ويولد نماذج ناقصة.
 3. عند الحاجة إلى ربط نتائج المسح الليزري إلى نظام إحداثيات معين أو عند عدم القدرة على ربط غمامة نقاط مع أخرى مكانياً فإننا سنحتاج لأعمال مسح طبوغرافي لتجاوز هذه المشاكل.
 4. الكلفة المرتفعة جداً للمساحات وللبرامج الملحقة بها.
- من ناحية أخرى، تتوفر مجموعة من النظم القائمة على استخدام الصور في توليد النماذج ثلاثية الأبعاد Image-based modelling. وهذه النظم تستخدم إما الصورة الواحدة، مزدوجات تجسيمية من الصور أو صوراً متعددة في توليد النموذج المطلوب. ولكن المشاكل الأساسية التي تعاني منها هذه النظم هو العدد المنخفض للنقاط ثلاثية الأبعاد الناتج عن الرقمنة على الصور الموجهة وهذا ما يجعل من التعبير عن الأجسام المعقدة هندسياً أمراً صعباً ويستهلك الكثير من الوقت.

نتيجة للأبحاث فيما يسمى بالبنية انطلاقاً من الحركة Structure from Motion (SfM) تم تطوير العديد من النظم التي يمكن اعتبارها محاكيات للماسح الليزري 3D laser scanners simulators من ناحية قدرتها على توليد عدد هائل من النقاط، وبشكل آلي، انطلاقاً من الصور الموجهة حيث أن كثافة هذه النقاط قد تزيد أحياناً عن كثافة النقاط المولدة باستخدام الماسح الليزري. وتتميز هذه النظم عن نظم المسح التصويري القريب التقليدية بأنها مؤتمتة بالكامل وأنها تتعامل مع أي نوع من آلات التصوير والصور. إن معظم هذه النظم مفتوح المصدر Open source أي أنه مجاني كما أنه لا يحتاج إلى خبرة طويلة للتعامل معه فهو سهل الاستخدام. إضافةً إلى ماسبق، هذا النوع من النظم يزود العاملين في مجال النمذجة بالعديد من المنتجات الصورية مثل الصور المصححة عامودياً Orthophotos (صورة تظهر فيها العناصر بمواقعها الطبوغرافية الصحيحة وذلك بعد تصحيح الانزياحات الناتجة عن اختلاف المناسيب بعملية التصحيح النفاضلي)، والشعاعية Vector مثل النموذج الرقمي للارتفاعات Digital Elevation Model (DEM) وكذلك بالنماذج الصورية الحقيقية للعناصر المصورة. كما يمكن لها التخاطب مع برمجيات أخرى مثل نظم التصميم بمعونة الحاسب CAD للقيام بمعالجات لاحقة. يمكننا ذكر البرامج التالية كأتمتة عن محاكيات المساحات الليزرية التي تستخدم مبادئ البنية من انطلاقاً من الحركة SfM : البرنامج المجاني Bundler (Snavey, N., 2012) و البرنامج (Furukawa, Y., Ponce, J., 2008) PMVS2 والبرنامج VisualSfM (Wu, Ch., 2013) وكلها تولد غمامات كثيفة من النقاط للعنصر المصور وتولد النموذج ثلاثي الأبعاد لهذا العنصر بشكل مؤتمت.

سنقوم في هذا البحث بعرض المبادئ النظرية التي يقوم عليها هذا النوع من النظم ثم سنوضح تدفق العمل فيها عبر تطبيق أحدها (البرنامج الروسي Agisoft PhotoScan) في توليد النماذج ثلاثية الأبعاد لحافلة نقل ركاب (لأغراض العرض) ولمنشآت أثرية (توثيق متري).

أهمية البحث وأهدافه

تكمُن أهمية هذا البحث في عرض إمكانيات النظم التصويرية التي تحاكي المساحات الليزرية ثلاثية الأبعاد في الحصول على نماذج ثلاثية الأبعاد مفصلة، موثوقة وكاملة. وتظهر أهمية البحث أيضاً في عرض تسلسل العمل مع هذا النوع من النظم قليلة التكاليف والتي يمكن لها أن تشكل حلاً بديلاً عن النظم الضخمة المكلفة في كثير من مجالات التطبيق مثل توثيق التراث المعماري ونمذجة الأبنية. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية :

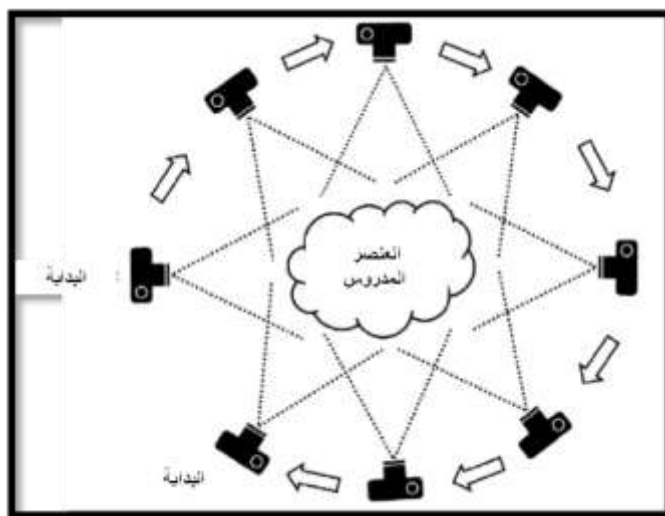
1. يسعى البحث لتقديم مراجعة لنظم النمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على الصورة ومنها النظم مفتوحة المصدر والنظم قليلة التكاليف.
2. يعرض البحث لتسلسل العمل في هذه النظم وذلك من خلال استخدام أحد هذه البرامج (البرنامج Agisoft PhotoScan).
3. إظهار فعالية النظم في الحصول على النماذج المخصصة لأغراض الإظهار وتوضيح مشاكل هذه النظم في هذه الحالة.
4. توجيه اهتمام غير المختصين في مجال المساحة التصويرية إلى الاستفادة من هذه النظم وذلك في اقتطاع الحصول على العديد من المنتجات الصورية والشعاعية المترية الخاصة بالمشهد المصور.
5. تبيان تأثير هذه النظم بطريقة النقاط الصور والحكم على دقتها وموثوقيتها وذلك عبر مقارنة نتائجها بقياسات حقيقية منقذة على العنصر المصور.

طرائق البحث ومواده

1- مفهوم البنية انطلاقاً من الحركة

تعتبر البنية انطلاقاً من الحركة، طريقة مسح تصويرية قليلة التكاليف ويمكن استخدامها كبديل مقبول عن المسح الليزري في الحصول على نماذج تفصيلية ثلاثية الأبعاد للعناصر. تعتبر هذه الطريقة مثالية للمشاريع ذات الميزانية القليلة كما أنها تقوم على نفس الأسس التي تقوم عليها المساحة التصويرية التجسيمية Stereoscopic photogrammetry والتي تستنتج البيئة ثلاثية الأبعاد للعناصر من سلسلة من الصور المتداخلة لهذه العناصر (الشكل (1)). وفي كل الأحوال، تختلف هذه الطريقة عن المساحة التصويرية التقليدية في أنها تحسب هندسية المشهد، مواقع وتوجيه آلة التصوير بشكل آلي دون الحاجة إلى التحديد المسبق لمجموعة من النقاط معلومة الإحداثيات ثلاثية الأبعاد. وبدلاً عن ذلك، يتم تحديد الإحداثيات ثلاثية الأبعاد للنقاط بشكل متوافق بتطبيق طريقة الحزم التكرارية والتي تقوم على استخدام سمات مقتطعة آلياً من مجموعة الصور المتداخلة (Snaveley, N., 2008). وكما هو موضح لاحقاً، فهذا الأسلوب هو الأفضل لمجموعات الصور المتداخلة بدرجة كبيرة (حتى 80%) والتي يقطع البنية ثلاثية

الأبعاد للمشهد والملقطة من عدد كبير من المواقع أو كما يشير إليه اسم الأسلوب: الصور الملتقطة من قبل مستشعر متحرك.



الشكل (1). البنية انطلاقاً من الحركة SfM. بدلاً من مزدوج تجسيمي واحد، يتطلب هذا الأسلوب العديد من الصور المتداخلة كمدخل لخوارزميات اقتطاع السمات وإعادة البناء ثلاثي الأبعاد.

لقد تم في الأصل اقتراح هذا الأسلوب في تسعينيات القرن الماضي من قبل الجهات العاملة في مجال الرؤية بمعونة الحاسب Computer vision (Spetsakis, M.E., Aloimonos, Y., 1991) وقد استفاد هذا الأسلوب من تطوير خوارزميات للربط الآلي للسمات Feature-matching المتشابهة على الصور قبل ذلك بعشر سنوات مما جعله أسلوباً آلياً بشكل كامل لنمذجة ثلاثية الأبعاد (Förstner, W., 1986). هذا وقد انتشر هذا الأسلوب بشكل واسع بفضل برمجيات مثل Microsoft PhotosynthTM في العام 2010 والبرنامج الروسي Agisoft PhotoScan والذين استخدموا في أبحاث كثيرة مثل (Niethammer, U., et al., 2012).

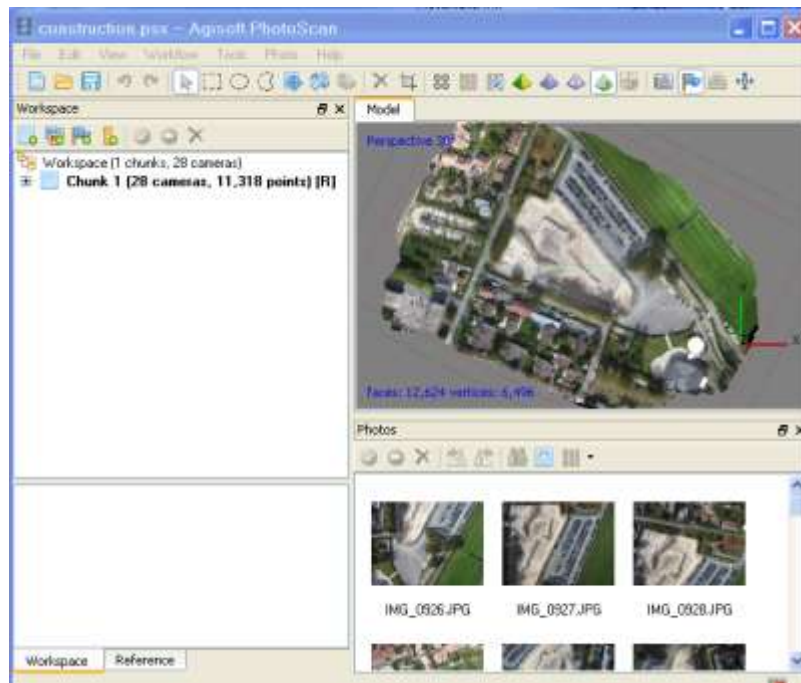
لتحديد المواقع ثلاثية الأبعاد للنقاط في المشهد المصور، تتطلب طرائق المساحة التصويرية البرمجية Softcopy photogrammetry التقليدية موقع وتوجيه آلة التصوير أو المواقع ثلاثية الأبعاد لسلسلة من نقاط الضبط والتي تساعد في تحديد مواقع وتوجيهات آلة التصوير (حساب معاملات التوجيه الخارجي Exterior orientation). وبالمقابل، لا يتطلب أسلوب الـ SfM المعرفة المسبقة لأي مما سبق من أجل إعادة بناء المشهد. ففي هذا الأسلوب يتم تحديد موقع وتوجيه آلة التصوير وبناء المشهد بشكل متواتر وذلك عبر التحديد الآلي للسمات المرتبطة في الصور المتعددة. وهنا، يتم تتبع هذه السمات من صورة إلى أخرى، مما يسمح بتقدير أولي لمواقع آلة التصوير وإحداثيات العنصر والتي يتم لاحقاً تحديدها النهائي بشكل تكراري باستخدام طريقة المربعات الصغرى اللاخطية Non-linear least-squares (Snavely, N., 2008).

وعلى عكس المسح التصويري التقليدي، تفتقر مواقع آلة التصوير المشتقة من الـ SfM إلى المقياس والتوجيه اللذين يؤمنهما مجموعة نقاط الضبط. وبالتالي، فإنه يتم توليد غمات النقاط ثلاثية الأبعاد في نظام إحداثيات منسوب إلى حيز الصورة Image-space والذي يجب ربطه لاحقاً مع نظام إحداثيات حيز العنصر Object-space. وفي معظم الحالات، يتم تحويل الإحداثيات من حيز الصورة إلى نظام إحداثيات مطلق بتطبيق تحويل مطابق ثلاثي الأبعاد

3-D similarity transformation باستخدام عدد قليل من نقاط الضبط Control points المعلومة في حيز العنصر.

2- البرنامج المستخدم

يتوفر العديد من البرمجيات التي تقوم بالنمذجة ثلاثية الأبعاد بتطبيق طريقة الـ SfM. ومن هذه البرمجيات ما هو مفتوح المصدر Open source (مجاني) مثل البرنامج VisualSfM والبرنامج PMVS2 ومنها ما خدمة على الأنترنت Web service مثل Autodesk Photofly و 123D Catch ومنها ما تجاري مثل البرنامج Agisoft PhotoScan والبرنامج PhotoModler Scanner. مقارنةً بباقي البرامج، قد يكون البرنامج الروسي Agisoft PhotoScan (وهو البرنامج المستخدم في هذا البحث) هو من أفضل النظم التي تمثل تقنية الـ SfM فهو يملك واجهة تخطيطية (الشكل (2)) سهلة الاستخدام كما يمكن المستخدم من الحكم على نوعية منتجه وربطه مع أي نظام إحداثيات إضافةً إلى إمكانية معالجة الصور الجوية والأرضية على حد سواء وكذلك تصدير النموذج الثلاثي الأبعاد بصيغ عديدة.



الشكل (2). الواجهة الرئيسية للبرنامج Agisoft PhotoScan.

3- العناصر المنمذجة

وقع اختيارنا على ثلاثة أنواع من العناصر حيث كانت أهداف وشروط نمذجة كل منها مختلفة عن الآخر (الشكل (3)). العنصر الأول هو حافلة لنقل الركاب أما العنصر الثاني فهو منشأ أثري موجود في مدينة بصرى الشام التابعة لمحافظة درعا والعنصر الثالث هو منشأ أثري موجود في مدينة سترازبورغ الفرنسية.

1. فيما يخص حافلة الركاب، فقد كان الهدف من النمذجة هو الإظهار فقط دون الاهتمام باقتطاع بيانات هندسية (إحداثيات، أطوال، مساحات،... الخ) من النموذج الناتج. كما أردنا من هذا المثال الإشارة إلى تأثير وجود سطوح شفافة (زجاج) على نوعية غمامة النقاط الناتجة.

2. أما بالنسبة للمنشأ الأثري الأول (واجهة الجامع العمري في بصرى الشام)، فقد كان الهدف هو الحصول على منتج مترى يوثق الوضع الحالي للمنشأ. هذا المنتج هو عبارة عن أورتوفوتو موضوع على المقياس بمساعدة مسافة مرجعية مقاسة على الواجهة. المشكلة هنا تتلخص في توفر صور قديمة لهذا المنشأ والتي لا تحقق عموماً اشتراطات طريقة البنية انطلاقاً من الحركة.
3. فيما يخص المنشأ الأثري الثاني (واجهة قلعة سترابورغ) فقد كان الهدف هو نفس الهدف السابق مع فارق توفر صور لهذا المنشأ تحقق اشتراطات طريقة البنية انطلاقاً من الحركة.



الشكل (3). العناصر النمذجة.

النتائج والمناقشة

قبل الدخول في تفاصيل عملية النمذجة، نبين فيما يلي تسلسل العمل في معظم خوارزميات البنية انطلاقاً من الحركة. هذا التسلسل هو نفس المطبق في كل البرمجيات التي تستخدم هذه الخوارزميات ومنها البرنامج Agisoft PhotoScan.

1. تصوير العنصر بحيث تظهر كل نقطة منه على صورتين على الأقل وبحيث يكون التداخل بين هاتين الصورتين بحدود % 80. هذا الجزء من العمل يدوي.
2. توجيه الصور ومعايرة آلة التصوير Camera calibration بشكل آلي.
3. استشعار السمات على الصور بشكل آلي.
4. ربط السمات المتشابهة على الصور بشكل آلي.
5. تحديد أولي لمواقع آلة التصوير في نظام إحداثيات حيز الصورة بشكل آلي.

6. بناء غمامة كثيفة من النقاط بشكل آلي وذلك بتطبيق طريقة ربط الصورة Image matching.
 7. توليد النموذج الشبكي للعنصر Mesh بشكل آلي.
 8. إعادة إسقاط الصور على سطوح النموذج الشبكي وتوليد النموذج الصوري بشكل آلي.
 9. وضع النموذج في جملة إحداثيات حيز العنصر بمساعدة نقاط ضبط بشكل نصف آلي.
 10. تصدير النموذج بصيغ متعددة لاستخدامه في تطبيقات لاحقة.
- قبل البدء بعملية التصوير، يجب أخذ التوصيات التالية بعين الاعتبار وذلك للحصول على نتائج دقيقة بطريقة البنية انطلاقاً من الحركة :

1. استخدام آلة تصوير رقمية ذات دقة تمييز Resolution مقبولة (5 ميغابكسل أو أكثر).
2. من الأفضل استخدام جزء بصري ثابت (إيقاف التكبير أو التصغير Zoom).
3. استخدام الكاميرا عند أعلى دقة تمييز ممكنة.
4. تجنب العناصر التي لا تملك نسجة Texture، اللامعة، العاكسة أو الشفافة.
5. إذا كان لابد من تصوير عنصر لامع، يجب التقاط صورته في طقس غائم.
6. يجب تجنب ما يحجب العنصر.
7. يجب تجنب وجود عناصر متحركة ضمن المشهد الذي نريد نمذجته.
8. يجب تجنب العناصر أو المشاهد المستوية بشكل تام.
9. أن تكون هنالك زيادة في عدد الصور أفضل من النقصان.
10. في حال استخدام صور جوية، فيجب على التداخل الجانبي أن يكون 60% والطولي 80%.
11. من الأفضل أن يشغل العنصر المصور معظم مساحة الصورة.
12. لا يجب محاولة وضع كامل العنصر في إطار الصورة ففي حال وجود أجزاء ناقصة منه على صورة ما يمكن تصويرها في صور أخرى.
13. يجب توفر شروط إضاءة جيدة.
14. يجب تجنب استخدام الفلاش أو وجود مصادر ضوئية في المشهد.

✓ نمذجة الحافلة

فيما يخص الحافلة، فقد تم التقاط 11 صورة للجانب الأيمن والأمامي منها (الشكل (4)) مع تأمين تداخل بين الصورة مساوٍ لـ 80% تقريباً. الصور التقطت باستخدام آلة تصوير غير معايرة مرفقة مع هاتف جوال وهي ذات دقة تمييز مساوي لـ 6 ميغابكسل والتي تعتبر دقة مميزة مناسبة للنمذجة لأغراض الإظهار.





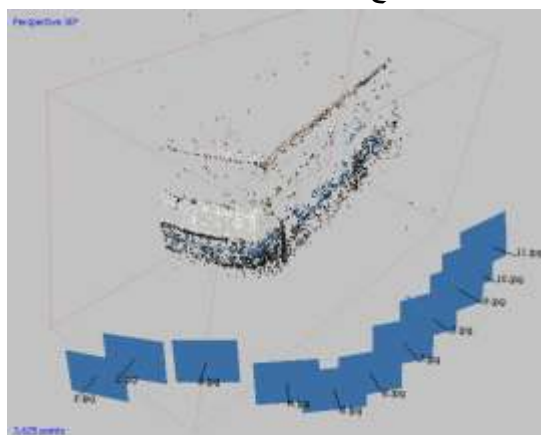
الشكل (4). صور الحافلة.

باستخدام مبادئ البنية انطلاقاً من الحركة المعتمدة في البرنامج Agisoft PhotoScan، مرّت عملية النمذجة

بالمراحل التالي :

✓ **مرافقة آلة التصوير Camera alignment**. وفي هذه المرحلة يتم البحث عن النقاط المشتركة

على الصور وربطها مع بعضها البعض كما يتم تحديد موقع آلة التصوير من أجل كل صورة. وكنتيجة لهذه المرحلة يتم الحصول على غمامة من النقاط المبعثرة (في هذه المرحلة، تم الاقتطاع الآلي لـ 3625 نقطة) وعلى مواقع آلة التصوير (الشكل (5)). في الواقع، يلزمنا معرفة مواقع آلات التصوير من أجل لبناء اللاحق للنموذج ثلاثي الأبعاد.



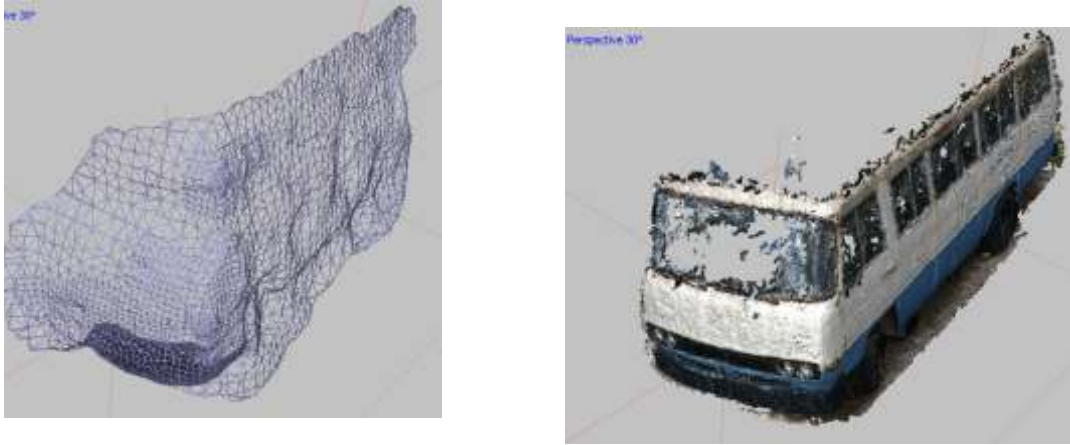
الشكل (5). تحديد مواقع آلة التصوير واقتطاع غمامة النقاط المبعثرة بشكل آلي.

✓ **المرحلة الثانية هي بناء غيمة كثيفة من النقاط Dense point cloud**. وهنا يتم استخدام

مواقع آلة التصوير والصور نفسها في بناء هذه الغيمة (الشكل (6)). تم هنا توليد 355000 نقطة تقريباً.

✓ **المرحلة الثالثة هي بناء الشبكة**. يتم هنا بناء تعبير شبكي مضلعاتي ثلاثي الأبعاد لسطح العنصر

استناداً إلى الغيمة الكثيفة من النقاط (الشكل (6)).



الشكل (6). غيمة النقاط الكثيفة والنموذج الشبكي.

مناقشة النوعية البصرية للنموذج الناتج :

من خلال معاينة النموذج (الغمامة الكثيفة من النقاط) نلاحظ أن عملية المسح قد نجحت نجاحاً كبيراً وأن هنالك كثافة كبيرة للنقاط المقاسة انطلاقاً من الصور تحاكي عملية المسح الليزري. إن النوعية الصورية للغمامة مقبولة فيما عدا الأجزاء الزجاجية من العنصر. إن هذا الأمر متوقع لأن عملية استشعار السمات الواقعة على هذه السطوح الشفافة وربطها، هي عملية صعبة جداً ويمكن أن تفشل في كثير من الأحوال. ومنه نجد أن النوعية البصرية لهذه السطوح سيئة وأن عدد النقاط المستشعرة عليها منخفض جداً مقارنةً بباقي أجزاء الحافلة (الشكل (7)).



الشكل (7). النوعية البصرية المتدنية للسطوح الزجاجية.

✓ نمذجة المنشأ الأثري الأول

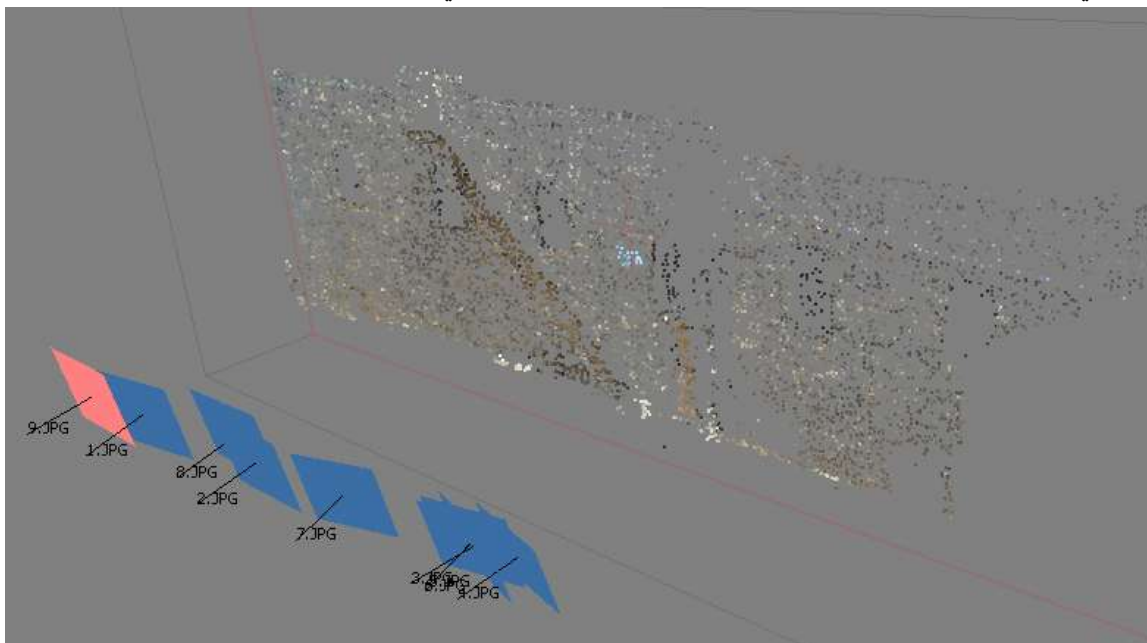
كما أسلفنا سابقاً، فإن الهدف من هذا المثال هو دراسة إمكانية الحصول على توثيق متري مقبول لواجهة منشأ أثري هو واجهة الجامع العمري في مدينة بصرى الشام. التوثيق هنا سيكون على شكل أورتوفوتو موضوع على المقياس وذلك بتطبيق مبادئ البنية انطلاقاً من الحركة. في الواقع، سنقوم باستخدام بعض الصور القديمة المتوفرة لهذا المنشأ الذي تعرّض للتخريب نتيجة الحرب وهي صور ملتقطة في العام 2005 بألة التصوير غير معايرة. المشكلة التي تعاني

منها هذه الصور هي أنها لا تحقق الاشتراطات الواجب توفرها لتطبيق طريقة البنية انطلاقاً من الحركة بشكل فعال. الفكرة هنا، هي أن نتحقق من مدى إمكانية الاستفادة منها في أعمال التوثيق ثلاثي الأبعاد للمنشأ. من جهة أخرى، تتوفر لدينا مسافة مرجعية مقاسة من مخطط AutoCAD للواجهة وسنستخدمها لوضع النموذج والأورتوفوتو على المقياس. لقد تم التقاط صور واجهة المنشأ (وعددتها 9 صور موضحة في الشكل (8)) باستخدام آلة التصوير الرقمية Kodak من النوع 8 ميغابكسل Megapixel.

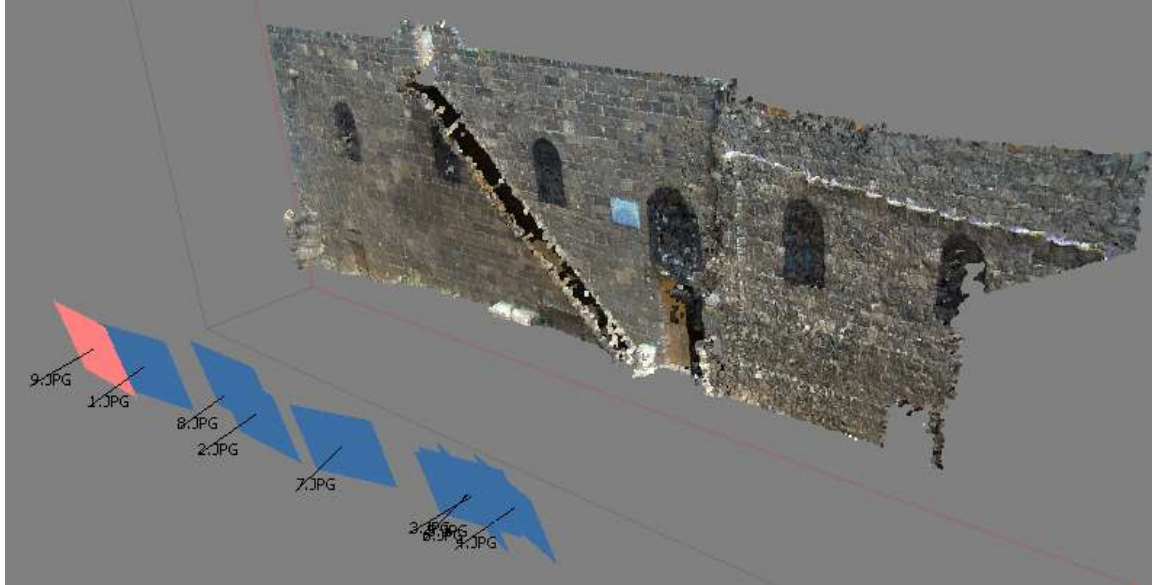


الشكل (8). صور واجهة المنشأ.

وكما في حالة الحافلة، مرت عملية النمذجة بمراحل متعددة، نبين فيما يلي نتائجها المرحلية :

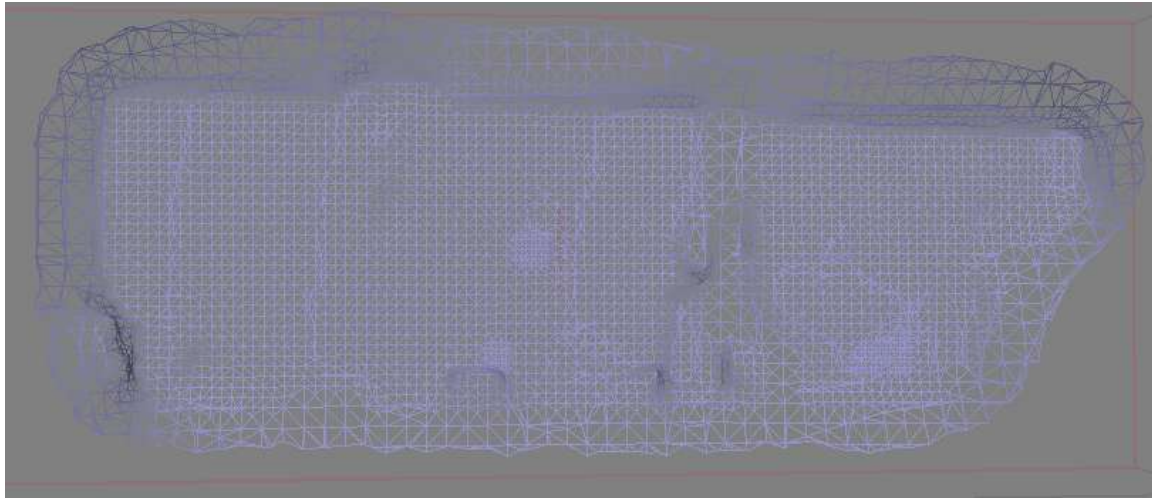


الشكل (9). تحديد مواقع آلة التصوير واقتطاع غمامة النقاط المبعثرة بشكل آلي.



الشكل (10). غيمة النقاط الكثيفة وعددها 732000 نقطة.

لتوليد الأورتوفوتو، يجب أولاً توليد النموذج الشبكي (الشكل (11)) ومن ثم استخدامه مع معاملات التوجيه الخارجي للصور لتحويل ارتسام الصورة من منظوري Perspective إلى متعامد Orthographic.



الشكل (11). النموذج الشبكي للواجهة وهو مؤلف من 9049 مثلث.

ولوضع الأورتوفوتو على المقياس، قسنا عرض باب الجامع (عن مخطط AutoCAD متوفر لهذه الواجهة) والذي يساوي 2.25 m (الشكل (12)) واستخدمنا هذه القيمة في وضع النموذج ثلاثي الأبعاد والأورتوفوتو على المقياس.



الشكل (11). مسافة الضبط المستخدمة للوضع على المقياس.

يبين الشكل 13 الأورتوفوتو الناتج والموضوع على المقياس :



الشكل (13). الأورتوفوتو الخاص بواجهة المنشأ الأثري .

مناقشة النوعية الهندسية للنموذج الناتج :

للحكم على النوعية الهندسية للأورتوفوتو الناتج، تم قياس مجموعة من المسافات المرجعية عن مخطط

AutoCAD متوفر لهذه الواجهة (الشكل 14) ومن ثم تم قياس نفس المسافات على الأورتوفوتو ومقارنة القيم

(الجدول (1)).



الشكل (14). المسافات المرجعية المستخدمة في المقارنة .

الجدول (1). الفروق بين المسافات المقاسة والحقيقية المقاسة على الواجهة.

المسافة	المقاسة على الواجهة (متر)	المقاسة على الأورتوفوتو (متر)	القيمة المطلقة للفرق (سم)
D1	1.17	1.04	13
D2	2.83	2.61	23
D3	10.90	10.52	38
D4	1.50	1.65	15

نلاحظ من الجدول أنّ الفروقات بين المسافات المقاسة على الأورتوفوتو والمسافات الحقيقية المقاسة على

الواجهة هي مرتفعة عموماً (وخصوصاً المسافة D2 والمسافة D3) ويمكن تفسير ذلك بمايلي :

1. المسافة D3 مقاسة على طول أدرج الجامع وهو جزء واقع في منسوب مختلف عن مناسيب باقي أجزاء الواجهة على النموذج الناتج وهذا يؤثر على دقة القياس لأن مشكلة الإزاحات الناتجة عن تغير المناسيب لم تحل كما يجب عند توليد الأورتوفوتو. إن هذه المشكلة ناتجة أصلاً عن أن الصور المتوفرة لا تحقق عملياً اشتراطات استخدام طريقة البنية انطلاقاً من الحركة بشكل فعال. وبمعنى آخر، لا تتحقق نسبة التداخل المطلوبة بين الصور المتتالية والتي يجب أن تكون 80% على الأقل.

2. بالنسبة للمسافة D2، فإننا نعتقد أن المشكلة ناتجة من عدم وضوح منطقة أسفل الباب على

الأورتوفوتو وذلك لأن عدد واتجاهات الصور التي تغطي هذا الجزء من الواجهة لا يحققان الشروط المثالية لتنفيذ طريقة البنية انطلاقاً من الحركة.

3. آلة التصوير المستخدمة غير معايرة ولا نعرف معاملات تزيغات عدستها وبالتالي فإننا لم نتمكن من

إزالة تأثير الأخطاء الناتجة عن هذه التزيغات.

ولكننا من جهة أخرى يمكننا اعتبار أن الأورتوفوتو الناتج مفيد في العديد من التطبيقات التي لا تتطلب دقة

عالية جداً. ونذكر هنا أنه لم يكن بالإمكان توليد هذا الأورتوفوتو لو لم نقم باستخدام طريقة البنية انطلاقاً من الحركة لأنها سمحت لنا بتوليد النموذج الرقمي للارتفاعات اللازم لإنتاج هذا الأورتوفوتو.

✓ نمذجة المنشأ الأثري الثاني

إن الهدف من هذا المثال هو توضيح تأثير طريقة النقاط الصور ومعايرة آلة التصوير على نتائج النمذجة

ودقتها. في الواقع، يتوفر لدينا عدة صور (عددتها 10 صور) لواجهة قلعة أثرية موجودة في مدينة سترازبورغ الفرنسية (الشكل 15).



الشكل (15). صور واجهة القلعة.

هذه الصور تحقق الاشتراطات التي عرضناها سابقاً والتي تضمن فعالية طريقة البنية انطلاقاً من الحركة كما أنها التقطت باستخدام آلة تصوير رقمية معايرة (معاملات تزيغات العدسة معلومة) هي آلة التصوير Fuji 9mm بدقة تمييز منخفضة 1.3 ميغابكسل. لقد تم الحصول على الصور وعلى ملف معايرة آلة التصوير وعلى بعض نقاط الضبط المقاسة على الواجهة (الشكل 16 والجدول 2) من موقع المعهد الوطني للعلوم التطبيقية في ستراسبورغ INSA de Strasbourg على شبكة الإنترنت <http://photogeo.u-strasbg.fr>.



الشكل (16). مواقع نقاط الضبط على الواجهة.

الجدول (2). إحداثيات نقاط الضبط.

N	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	987.075	1006.585	99.631
2	985.813	1000.866	99.006
3	985.419	998.821	98.961
4	985.742	1000.51	100.626
5	986.675	1004.923	100.641
6	987.403	1006.84	104.509
7	985.613	998.46	104.457
8	986.324	1001.75	104.486
9	985.643	1001.252	100.908
10	985.759	1000.494	101.909
11	986.686	1004.928	101.936

سنستخدم 7 نقاط من النقاط السابقة كنقاط ضبط وسنترك 4 نقاط كنقاط تحقق Check points وذلك للحكم على نوعية الأورتوفوتو الناتج. وكما في حالة المنشأ الأثري السابق، مرت عملية النمذجة بنفس المراحل. فيما يخص نموذج النقاط الكثيفة فقد تم توليد 571000 نقطة بشكل آلي ومن ثم تم توليد النموذج الشبكي والذي يحوي 180000 مثلث أو وجه Face. تم بعد ذلك توليد النموذج الصوري الحقيقي للواجهة (الشكل 17).



الشكل (17). النموذج الصوري الحقيقي لواجهة القلعة .

باستخدام النموذج الشبكي ومعطيات توجيه الصور المحسوبة باستخدام 7 نقاط ضبط تم توليد الأورتوفوتو للواجهة (الشكل 18) . قمنا لاحقاً بقياس إحداثيات نقاط الاختبار (الموزعة بشكل متجانس على الواجهة) على هذا الأورتوفوتو ومقارنتها مع إحداثياتها الحقيقية. يبين الجدول 3 هذه القيم.



الشكل (18). الأورتوفوتو لواجهة القلعة .

الجدول (3). الفروق في إحداثيات نقاط التحقق.

N	الإحداثيات الحقيقية			الإحداثيات المقاسة			الفروقات		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
1	987.075	1006.585	99.631	987.077	1006.445	99.728	-0.002	0.14	-0.097
3	985.419	998.821	98.961	985.387	998.862	98.953	0.032	-0.041	0.008
6	987.403	1006.84	104.509	987.415	1006.786	104.503	-0.012	0.054	0.006
9	985.643	1001.252	100.908	985.663	1001.328	101.307	-0.02	-0.076	-0.099

نلاحظ من الجدول السابق أن دقة الأورتوفوتو الناتج أفضل من دقة الأورتوفوتو السابق وذلك للأسباب التالية :

1. توفر عدد جيد من معطيات الضبط المقاسة بدقة (نقاط الضبط).
2. معايرة آلة التصوير المستخدمة.
3. النقاط الصور بأسلوب يحقق اشتراطات طريقة البنية انطلاقاً من الحركة.

في الواقع، يمكن اعتبار الدقة التي حصلنا عليها مقبولة لأغراض التوثيق المتري وذلك مقارنة بالأورتوفوتو السابق. على كل، نلاحظ وجود بعض الفروقات الكبيرة في الإحداثيات ويمكننا إرجاع ذلك إلى دقة التمييز المنخفضة لآلة التصوير المستخدمة.

الاستنتاجات والتوصيات

نستنتج من هذا البحث أنه بالإمكان استخدام النمذجة انطلاقاً من الصور كحل بديل للمسح الليزري ثلاثي الأبعاد وهو الحل القائم على استخدام الصور كأساس للنمذجة وعلى تطبيق مبادئ طريقة البنية انطلاقاً من الحركة. لقد استنتجنا أيضاً أن قوة هذا الحل تكمن في أنه قليل التكاليف، يمكن أن يستخدم أية آلة تصوير، مؤتمت بشكل كامل ولا يتطلب إلا استخدام صور ملتقطة بترتيب معين. كما أوضحنا من خلال الأمثلة العملية أن طريقة البنية انطلاقاً من الحركة تمكننا من توليد غمامة كثيفة من النقاط والتي قد تفوق كثافتها في بعض الحالات كثافة النقاط التي نحصل عليها بالمسح الليزري ثلاثي الأبعاد، وهذا ما يسمح بتوليد نماذج ثلاثية الأبعاد تفصيلية ودقيقة وتلبي احتياجات الكثير من التطبيقات. من ناحية أخرى استنتجنا أنه في حالة التطبيقات التي تتطلب دقة عالية فلا بد من توفر نقاط ضبط محددة بدقة على العنصر أو توفر مسافات مرجعية تستخدم لوضع النموذج الناتج على المقياس وكذلك يجب معايرة آلة التصوير المستخدمة واستخدام صور ذات دقة تمييز عالية.

في النهاية يمكننا أن نوصي استخدام طريقة البنية انطلاقاً من الحركة من أجل توليد نماذج بغرض العرض وذلك عند عدم توفر معلومات عن آلة التصوير المستخدمة أو توفر معطيات ضبط. ولكن عند الرغبة بالحصول على بيانات هندسية دقيقة (وذلك من أجل العناصر المعقدة هندسياً وخاصةً في مجال توثيق العناصر الأثرية كاللقى والتماثيل والبنى التي تحوي تفاصيل معمارية معقدة)، فإننا نوصي باستخدام آلة تصوير معايرة مع معطيات ضبط دقيقة. كما نوصي باستخدام البرمجيات المجانية مفتوحة المصدر المتوفرة على الشبكة العنكبوتية أو البرمجيات التجارية قليلة التكاليف في أعمال النمذجة لأنها أثبتت دقتها وموثوقيتها.

المراجع

- [1] ROSSER,N.J. ؛ PETLEY,D.N.؛ LIM, M.؛ DUNNING,S.A. ؛ALLISON, R.J. *Terrestrial Laser Scanning For Monitoring The Process Of Hard Rock Coastal Cliff Erosion*. Quarterly Journal Of Engineering Geology & Hydrogeology 38, 2005, 363–375.
- [2]SNAVELY,N.BUNDLER.USA,2012.AvailableAt [Http://Phototour.Cs.Washington.Edu/Bundler/#S3](http://Phototour.Cs.Washington.Edu/Bundler/#S3).
- [3] FURUKAWA, Y.؛ PONCE, J. *Accurate Camera Calibration From Multi-View Stereo And Bundle Adjustment*. IEEE Conference On Computer Vision And Pattern Recognition. USA, 2008.
- [4]WU,Ch. VisualsfmVer.0.5.22.USA,2013.AvailableAt [Http://Homes.Cs.Washington.Edu/~Ccwu/Vsfm/](http://Homes.Cs.Washington.Edu/~Ccwu/Vsfm/).

- [5] SNAVELY,N. *Scene Reconstruction And Visualization From Internet Photo Collections*, Unpublished Phd Thesis, University Of Washington, USA., 2008.
- [6] SPETSAKIS,M.E.؛ ALOIMONOS,Y. *A Multi-Frame Approach To Visualmotion Perception*. International Journal Of Computer Vision 6., 1991, 245–255.
- [7] FÖRSTNER, W. *A Feature-Based Correspondence Algorithm For Image Matching*. International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing 26., 1986, 150–166.
- [8] NIETHAMMER, U.؛ JAMES, M.R., ROTHMUND, S.؛ TRAVELLETTI, J.؛ JOSWIG, W. *UAV-Based Remote Sensing Of The Super Sauze Landslide: Evaluation And Results*. Engineering Geology 128., 2012, 2–11.