

Objects volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone camera

Dr. Omar Al Khalil*

(Received 17 / 10 / 2018. Accepted 28 / 3 / 2019)

□ ABSTRACT □

The article describes how the Structure-from-Motion (SfM) method can be used to calculate the volume of objects. In the proposed workflow, data is obtained using a smartphone. The volume is computed using a low-cost software and free open source software on a personal computer.

The input data is still images and video frames obtained by a smart phone. To verify the method, two laboratory tests on a regular form object and irregular form object of a known volumes, have been carried out. In each test, still images and video frames were used and the results were compared.

In the case of the regular object and the still images, the results showed that no significant difference was found between the real and the computed volumes. When using video frames, the results were influenced by the geometric resolution of the frames. In the case of irregular object, the irregularity of the form influenced the resulted volume. On the other hand, the results showed the effects images number and the type of control data on the results.

Key words: Structure from Motion (SfM), Smart Phone, 3D Mesh Model, Points Cloud, Open Source Software.

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

E-mail: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

تقدير حجوم العناصر باستخدام المسح التصويري بطريقة "الحصول على البنية انطلاقاً من الحركة" وآلة تصوير الهاتف النقال

الدكتور عمر محمد الخليل *

(تاريخ الإيداع 17 / 10 / 2018. قُبِلَ للنشر في 28 / 3 / 2019)

□ ملخص □

يصف هذا البحث كيفية استخدام طريقة الحصول على البنية انطلاقاً من الحركة في حساب حجوم العناصر. في طريقة العمل المقترحة، تم الحصول على البيانات باستخدام هاتف نقال أما حساب الحجم فقد تم باستخدام برنامج منخفض التكاليف وبرامج مجانية مفتوحة المصدر وحاسب شخصي. معطيات الدخل هي صور ساكنة وتسجيلات فيديو تم الحصول عليها باستخدام آلة تصوير الهاتف النقال. وللتحقق من الطريقة، تم القيام باختبارين على عنصر منتظم الشكل وعلى عنصر غير منتظم الشكل، حجمهما معلوم. وفي كل اختبار، تم استخدام الصور وتسجيلات الفيديو في حساب الحجم وتمت مقارنة النتائج. بالنسبة للعنصر المنتظم، فقد بيّنت النتائج أنه لا معنى للفرق بين حجمه الحقيقي والحجم المحسوب من الصور الساكنة، في حين أثرت دقة تمييز الصور المقطعة من تسجيل الفيديو على دقة النتائج. أما في حالة العنصر غير المنتظم، فقد أثر عدم انتظام الشكل أيضاً على دقة الحجم المحسوب. من ناحية أخرى، بيّنت النتائج تأثير عدد الصور ونوع معطيات الضبط على النتائج.

الكلمات المفتاحية: البنية انطلاقاً من الحركة، هاتف نقال، نموذج شبكي ثلاثي الأبعاد، غمامة نقاط، برنامج مفتوح المصدر.

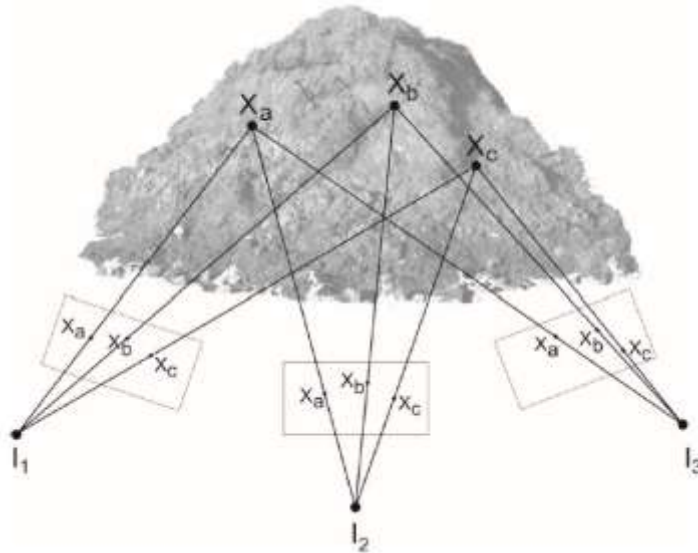
* أستاذ في قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سوريا.

E-mail: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

مقدمة

لقد حدثت تطورات جوهرية في مجال العلوم المكانية أو الجيوماتيك Geomatics خلال السنوات العشرين الماضية، حيث بدأت طرائق المسح التصويري المؤتمت وتقنيات المسح الليزري بالحلول تدريجاً مكان الطرائق الجيوديزية التقليدية وذلك في اكتساب البيانات الطبوغرافية [1]. ففي الوقت الحالي، يتم استخدام الماسحات الليزرية الأرضية (ALS) Terrestrial Laser Scanners (TLS) والماسحات الليزرية المحمولة جواً Airborne Laser Scanners (ALS) على نطاق واسع لاكتساب البيانات، والتي تستخدم في العديد من المجالات مثل علم تشكّل الأرض (الجيومورفولوجيا) Geomorphology [2]، علم الآثار Archaeology [3]، علم البيئة Ecology [4] وفي المجالات الهندسية المتنوعة. هذا، وتتميز البيانات المكتسبة باستخدام المسح الليزري بكثافتها العالية وبدقتها الهندسية وبالتالي فهي تستخدم بشكل أساسي في توليد النماذج الرقمية ثلاثية الأبعاد للسطوح Digital Surface Models (DSMs) والنماذج الرقمية للأرض Digital Terrain Models (DTMs). صحيح أنه قد تم تصميم تقنيات المسح الليزري من أجل الحصول الآلي والسريع على البيانات، ولكنها تعاني من مشكلة أساسية وهي الكلفة المرتفعة للتجهيزات ووجوب استخدام برمجيات متخصصة لمعالجة البيانات وتحليلها.

من ناحية أخرى، يبدو أن طريقة الحصول على البنية انطلاقاً من الحركة Structure-from-Motion (SfM)، والتي هي طريقة قياس واسعة الانتشار وقليلة الكلفة [5] وترجع أصولها إلى مجال الرؤية بمعونة الحاسب، هي تقنية المستقبل التي ستستخدم في اكتساب البيانات الأرضية. وعند استخدام الـ SfM، يتم توليد النماذج ثلاثية الأبعاد للمشاهد انطلاقاً من سلاسل من الصور المتداخلة التي يتم التقاطها باستخدام آلة تصوير في حالة حركة (الشكل (1)).



الشكل 1). مخطط طريقة الحصول على البنية انطلاقاً من الحركة.

إن الفرق الأساسي بين طريقة SfM والمساحة التصويرية التجسيمية Stereoscopic Photogrammetry هو أن الحسابات اللازمة للحصول على الموقع الدقيق لنقطة في الفراغ ثلاثي الأبعاد تتم بشكل آلي وأن معرفة المواقع الدقيقة لآلات التصوير ليس ضرورية لإنجاز هذه الحسابات. ومن جهة أخرى، يمكن استخدام تسجيلات الفيديو في حساب النماذج ثلاثية الأبعاد وذلك لأن توجيه آلة التصوير لا يؤثر على تحديد مواقع النقاط في الفراغ.

مما يضيف نقطة من نقاط القوة إلى طريقة الـ SfM هو توفر عدة برامج لمعالجة غمامات النقاط Points clouds الناتجة عن هذه الطريقة، منها ما هو تجاري مثل Microsoft Photosynth، PhotoModeler و Agisoft Photoscan [6] ، والبرنامج ContextCapture المستخدم في بحثنا. ومنها ما هو مفتوح المصدر Open Source مثل Bundler و VisualSFM [7] أو مجاني مثل Regard 3D. تستخدم هذه البرمجيات طريقة التعديل بالحزم Bundle Adjustment في المرحلة الأخيرة من مراحل تحديد مواقع النقاط وذلك لتقليل أخطاء إعادة الإسقاط بين الصورة والمواقع المحتملة لهذه النقاط. ونشير إلى أن غمامات النقاط الناتجة عن طريقة الـ SfM، هي غمامات نسبية وتجب معايرتها لإعطائها أبعاداً واقعيةً [8] ويتم هذا سواء بمساعدة مسافات مرجعية تسمح بوضع الغمامات على المقياس أو باستخدام نقاط الضبط Control Points.

نلاحظ ازدياد انتشار طريقة الـ SfM يوماً بعد يوم وذلك لأنها طريقة منخفضة التكاليف، حيث أنه يكفي استخدام آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة (أو الذكية) Smart Phones مع برمجيات مجانية أو تجارية رخيصة وحاسب شخصي لتطبيقها. ولكن نشير إلى أننا بحاجة لوقت أطول ومهارات أكبر للحصول على البيانات ومعالجتها. لقد بينت عدة أبحاث فعالية آلات تصوير الهواتف النقالة والبرمجيات المجانية أو التجارية في الحصول على نماذج ثلاثية الأبعاد من الممكن مقارنتها من حيث الدقة الهندسية والقدرة التعبيرية مع النماذج التي نحصل عليها بالمسح الليزري [9]. كما تشير النتائج الموضحة في [10] إلى أن طريقة SfM، يمكن أن تستخدم للحصول على مجموعات بيانات عالية الجودة لبناء النموذج الرقمي لسطح التضاريس، بحيث يمكن مقارنتها مع تلك التي يتم الحصول عليها باستخدام أجهزة المسح الليزري، وهي مناسبة للكثير من التطبيقات مثل الكشف عن التغيرات الجيومورفولوجية والنمذجة الهيدروديناميكية. وكذلك بين الباحثون في [1]، أنه من الممكن الحصول على دقة شاقولية من فئة الديسيمتر باستخدام طريقة SfM في الحصول على النماذج الرقمية للارتفاعات وذلك عبر مقارنة النموذج الرقمي للارتفاعات المشتق من SfM مع نموذج مماثل تم الحصول عليه باستخدام المسح الليزري في المناطق المعقدة تضاريسياً.

سنقوم في هذا البحث بتوضيح كيفية استخدام طريقة الـ SfM في حساب حجوم الأجسام ذات الاشكال المنتظمة وذات الاشكال غير المنتظمة وذلك انطلاقاً من صور هذه العناصر (صور ساكنة أو تسجيلات فيديو) الملتقطة باستخدام آلة تصوير مرفقة مع هاتف نقال وبرنامج تجاري منخفض الكلفة. يعتبر هذا التطبيق من التطبيقات الحديثة لطريقة SfM والذي يعتبر مفيداً جداً في العديد من المجالات التي تتطلب معرفة حجوم الأجسام مثل تحديد كمية الأعمال الترابية وغيرها.

أهمية البحث وأهدافه

تتبع أهمية هذا البحث من أنه يثبت إمكانية استخدام التجهيزات العادية واليومية مثل الهواتف النقالة مع برمجيات منخفضة التكاليف وأخرى مجانية في تطبيقات تتطلب استخدام تجهيزات وبرمجيات متخصصة ذات كلفة عالية.

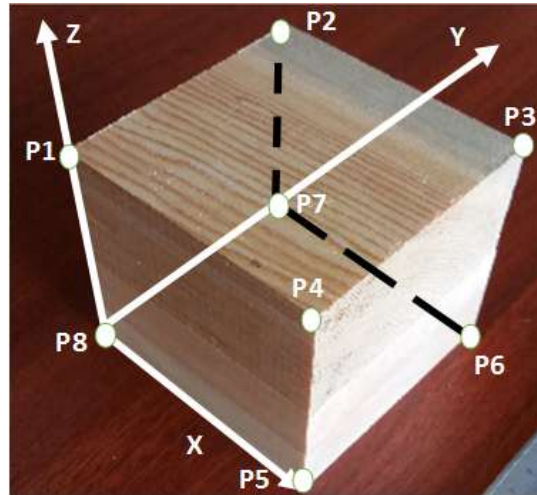
إن الهدف الرئيسي من هذا البحث هو إظهار كيف يمكن استخدام طريقة SfM لحساب حجوم العناصر المنتظمة غير المنتظمة (كالتضاريس)، حيث تم اختبار قابلية استخدام هذه الطريقة عن طريق إجراء قياسات باستخدام صور وتسجيلات فيديو تم الحصول عليها باستخدام الهاتف النقال Samsung Galaxy J5، والقيام بالمعالجة

بالاستعانة ببرنامج تجاري منخفض التكاليف وبرنامج مفتوحة المصدر مجاني لمعالجة غمامات النقاط ثلاثية الأبعاد وبناء النموذج الشبكي Mesh Model (أو السطوحوي) منها. كما يهدف البحث إلى دراسة نوعية الحجوم الناتجة عن استخدام تسجيلات الفيديو وذلك بمقارنتها مع تلك الناتجة عن استخدام الصور الساكنة، وكذلك إلى مناقشة العوامل التي تؤثر على حساب الحجوم انطلاقاً من الصور.

طرائق البحث ومواده

1- عنصر الاختبار ذو الشكل المنتظم

عنصر الاختبار الأول هو عبارة عن متوازي مستطيلات خشبي أبعاده (9.38 cm x 9.38 cm) أما ارتفاعه فهو 8.69 cm. تم تعريف جملة إحداثيات محلية لهذا العنصر وتم تحديد الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لثماني نقاط ضبط في هذه الجملة كما هو موضح في الشكل (2) والجدول (2).



الشكل (2). عنصر الاختبار الأول مع توزع نقاط الضبط عليه.

الجدول (1). إحداثيات نقاط الضبط للعنصر المنتظم.

Z (cm)	Y (cm)	X (cm)	N
108.69	100.00	100.00	P1
108.69	109.38	100.00	P2
108.69	109.38	109.38	P3
108.69	100.00	109.38	P4
100.00	100.00	109.38	P5
100.00	109.38	109.38	P6
100.00	109.38	100.00	P7
100.00	100.00	100.00	P8

2- عنصر الاختبار ذو الشكل غير المنتظم

عنصر الاختبار الثاني هو عبارة عن كتلة رمليّة معلومة الحجم. في الواقع، تم استخدام أسطوانة ذات أبعاد معلومة وملؤها بالرمل ومن ثم تم تفريغها لتشكّل عنصر الاختبار. نبين في الشكل (3) الكتلة الرمليّة والأسطوانة مع أبعادها الحقيقية. لوضع النموذج على المقياس، تم تصوير مسطرة معدنية دقيقة طولها 30 cm.



الشكل 3(. عنصر الاختبار الثاني مع البعد المرجعي.

3- الهاتف النقال Samsung Galaxy J5

وهو الهاتف الذي تم استخدامه في التقاط الصور وتسجيلات الفيديو للعناصر المدروسة. تتميز آلة تصوير بدقة تتميز عظمى تصل تقريباً إلى 13 Megapixels في حالة الصور الساكنة مع مستشعر من النوع من النوع CMOS BSI أبعاده (4128x3096) بكسلاً، كما يمكننا باستخدام آلة التصوير هذه الحصول على تسجيلات فيديو ذات جودة عالية.

4- البرامج المستخدمة

ContextCapture البرنامج ✓

وهو برنامج مطور من قبل شركة Bentley Systems ويعتبر من البرامج المستخدمة في الحصول الأتوماتيكي على نماذج ثلاثية الأبعاد عالية الدقة انطلاقاً من الصور أو من تسجيلات الفيديو وذلك بتطبيق مبادئ طريقة SfM. تمر عملية المعالجة في هذا البرنامج أولاً بمرحلة التثليث الجوي Aerotriangulation أي توجيه الصور ومن ثم بعملية البناء Reconstuction للنموذج وبعده أشكال منها غمامة النقاط الكثيفة أو النموذج السطحي والصورى أو الصور المصححة عامودياً Orthophoto [11]. يستخدم هذا البرنامج أحدث تقنيات البناء ثلاثي الأبعاد من الصور المتعددة Multi-view المطورة في مجال الرؤيا بمعونة الحاسب، كما يمكن من التعامل مع معطيات الضبط بشكليها الأساسيين: نقاط ضبط أو مسافات مرجعية.

MeshLab البرنامج ✓

وهو برنامج مجاني مخصص لمعالجة وتحرير النماذج الشبكية ثلاثية الأبعاد. يمتلك هذا البرنامج مجموعة من الأدوات التي تستخدم لتنظيف النماذج الشبكية الناتجة عن برمجيات النمذجة الصورية وغيرها ولملئ الفراغات الموجودة فيها.

CloudCompare البرنامج ✓

وهو برنامج مجاني مفتوح المصدر مخصص لمعالجة ومقارنة غمامات النقاط الكثيفة وكذلك النماذج الشبكية أو السطوحية ثلاثية الأبعاد. يمكننا باستخدام هذا البرنامج حساب حجوم النماذج الشبكية وحساب المسافات المحلية بين غمامتي نقاط كثيفتين وترشيح ضجيج القياسات وكذلك تقسيم Segmentation النقاط إلى مجموعات فرعية متوافقة مع عناصر معينة.

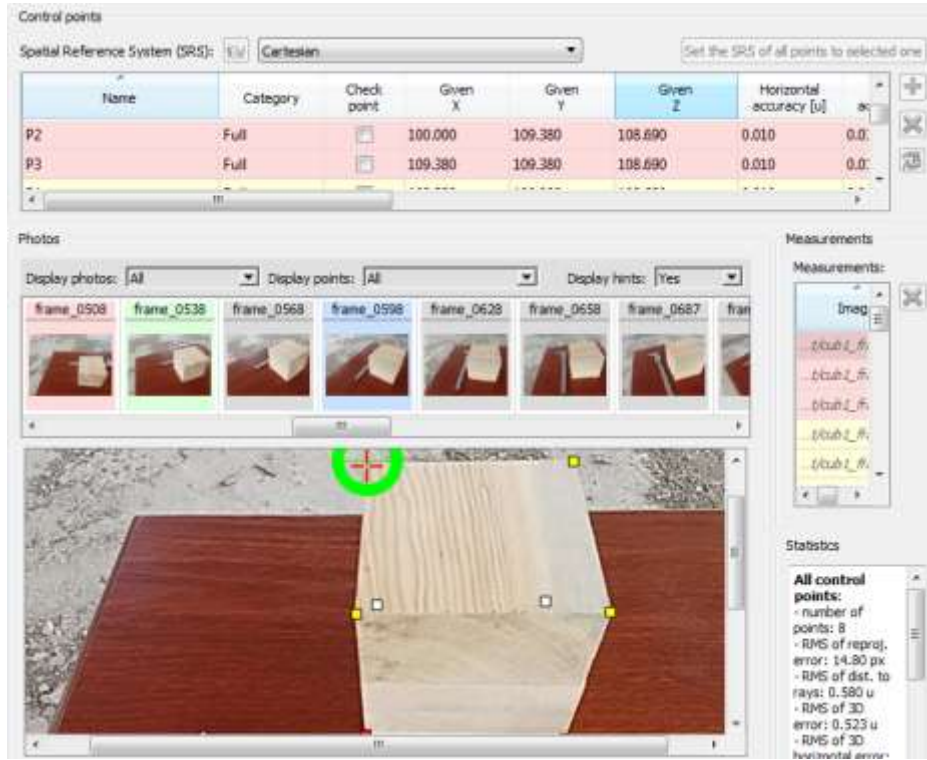
✓ البرنامج Free Video to JPG Converter

وهو برنامج مجاني يستخدم لتحويل تسجيل الفيديو إلى لقطات. صحيح أن البرنامج ContextCapture المستخدم في بحثنا يملك إمكانية التعامل مع تسجيلات الفيديو، إلا أن التحكم بمعدّل اللقطات ليس سهلاً. لذلك استخدمنا البرنامج Free Video to JPG Converter والذي يملك إمكانية تحكم سهلة بمعدّل اللقطات Frames ratio. وهذا يعني أنه إذا كانت مدة تسجيل الفيديو دقيقة واحدة (60 ثانية)، فيمكننا اقتطاع عدد من اللقطات واحدة خلال زمن نحدده. فإذا كان عدد اللقطات التي نريد اقتطاعها هي لقطة واحدة كل 1 ثانية، فيمكننا عندها اقتطاع 60 لقطة.

النتائج والمناقشة

أولاً: حساب حجم العنصر ذي الشكل المنتظم

قمنا بالتقاط 16 صورة للعنصر باستخدام آلة تصوير الهاتف النقال وذلك بدقة تمييز عظمى (تساوي 13 ميغابكسل)، وبحيث تغطي الصور كل أجزاء العنصر. قمنا أيضاً بتسجيل مقطع فيديو للعنصر مدته 46 ثانية حاولنا خلاله تغطية كل أجزاء العنصر. قمنا لاحقاً بعد ذلك بتحويل هذا التسجيل إلى لقطات بحيث اقتطعنا لقطة كل 1 ثانية فحصلنا على 46 لقطة. كان من الممكن استخدام كل هذه اللقطات في النمذجة ولكن الحساب سيكون ثقيلاً جداً وسيحتاج إلى ذاكرة كبيرة. في كل الأحوال، إن توفر هذا العدد الكبير من اللقطات أتاح لنا اختيار ما يلزم منها للنمذجة (27 صورة). وعند الاختيار، أخذنا بعين الاعتبار ظهور كل نقطة من نقاط العنصر على صورتين على الأقل. قمنا بعد ذلك، بإدخال اللقطات (الساكنة والمقتطعة من تسجيل الفيديو) ونقاط الضبط إلى برنامج المعالجة. قمنا بقياس نقاط الضبط على كل الصور (الشكل (4)) ومن ثم قام البرنامج وبشكل آلي بحساب مواقع آلة التصوير وغمامة النقاط الكثيفة والنموذج الشبكي وكذلك الدقة على نقاط الضبط (الشكل (5) والجدول (2)).



الشكل 4). قياس نقاط الضبط على صور عنصر الاختبار المنتظم باستخدام ContextCapture.

نواتج معالجة تسجيل الفيديو

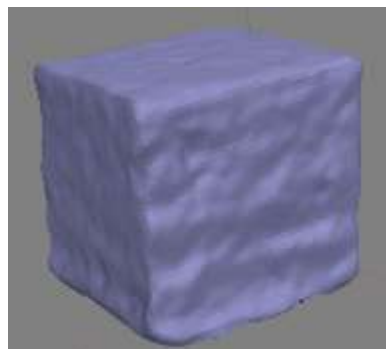


غمامة النقاط الكثيفة

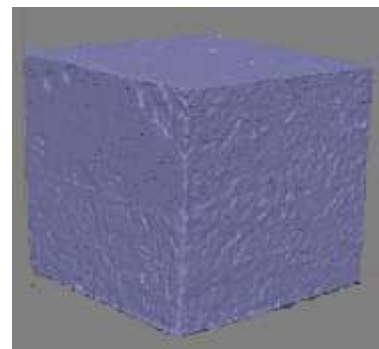
نواتج معالجة الصور الساكنة



غمامة النقاط الكثيفة



النموذج الشبكي



النموذج الشبكي

الشكل 5). غمامات النقاط الكثيفة والنماذج الشبكية لعنصر الاختبار المنتظم.

الجدول (2). مدخلات ونواتج المعالجة للعنصر المنتظم.

عدد الصور المستخدمة	عدد نقاط الضبط المستخدمة	دقة تمييز الصورة (Megapixels)	عدد نقاط الغمامة الكثيفة	عدد وجوه النموذج الشبكي	الخطأ الكلي على نقاط الضبط	
16	8	13.00	1008606	213090	2 mm	الصور الساكنة
27	8	0.31	15814	30430	8 mm	تسجيل الفيديو

إن المشكلة التي تعاني منها النماذج الشبكية السابقة هي وجود بيانات شاذة إضافة إلى أنها نماذج غير مغلقة وبالتالي لا يمكن حساب حجمها. إن عدم إغلاقها عائد على وجود جزء من العنصر لم يتمكن من تصويره وهو جزء القاعدة. لتجاوز هذه المشاكل، قمنا بتصدير هذه النماذج (لحالي الصور الساكنة وتسجيلات الفيديو) إلى البرنامج MeshLab ومن ثم تم استخدام الأدوات الموجودة فيه لإزالة الضجيج في البيانات وإعادة بناء النماذج الشبكية المغلقة (الشكل (6)).



الشكل (6). معالجة النموذج الشبكي لعنصر الاختبار المنتظم داخل MeshLab.

تم بعد ذلك تصدير النماذج إلى البرنامج CloudCompare وذلك لحساب حجمها. نبين في الجدول (3) حجم هذه النماذج المحسوبة مع مقارنتها مع الحجم الحقيقي للجسم ذي الشكل المنتظم. نلاحظ من الجدول (3) أن:

1. الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من الصور الساكنة يكاد يكون مهماً وهذا يعود إلى دقة التمييز الكبيرة للصور المستخدمة وإلى عددها الكبير، واللذين ظهر أثرهما في العدد الكبير لوجوه النموذج الشبكي (الشكل (5)) مما ساعد على استقرار أفضل لشكل العنصر ثلاثي الأبعاد وبالتالي إلى تحديد حجمه بشكل أدق. ومن ناحية أخرى، يعتبر انتظام شكل العنصر المدروس عاملاً مهماً وذلك لأن هذا يجعل من عملية استقراره انطلاقاً من غمامة النقاط الكثيفة أسهل وأدق بالنسبة لخوارزميات النمذجة.

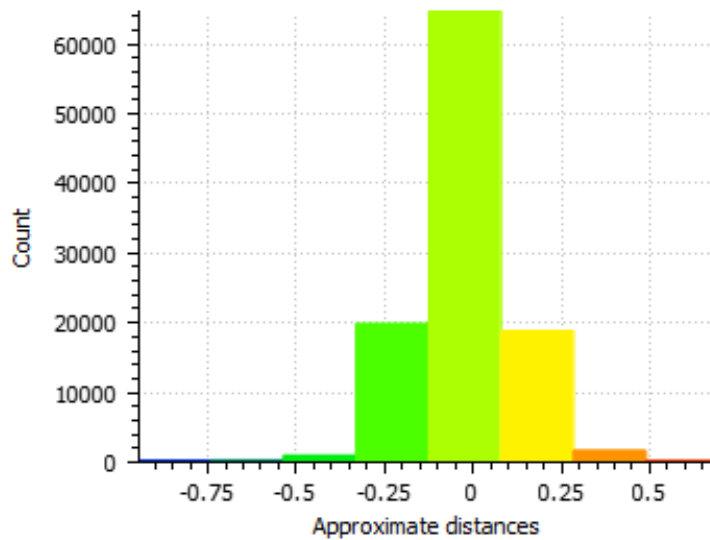
2. الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من صور الفيديو صغير ولكنه يساوي سبعة أضعاف الفرق الناتج عن الحالة السابقة. إن هذا عائد إلى دقة التمييز المنخفضة جداً للصور المقطعة من تسجيلات الفيديو مقارنةً بدقة تمييز الصور الساكنة (أقل تقريباً بـ 42 مرة) وذلك بالرغم من أن عدد الصور المستخدمة في حساب النموذج الشبكي في حالة الفيديو أكبر من حالة الصور الساكنة. لقد تجلّى تأثير دقة التمييز المنخفضة في العدد القليل لوجوه النموذج الشبكي الناتج (الشكل (5)) مما جعل من عملية استقراء الشكل ثلاثي الأبعاد أبعد عن الواقع مقارنةً بحالة الصور الساكنة.

الجدول (3). مقارنة الحجوم المحسوبة من الصور وتسجيلات الفيديو مع الحجم الحقيقي للعنصر المنتظم.

النسبة المئوية للفرق	الفرق (سنتيمتر مكعب)	الحجم (سنتيمتر مكعب)	
		764.58	الحقيقي
0.10 %	0.79	763.79	المحسوب من الصور
0.72 %	5.54	770.12	المحسوب من تسجيلات الفيديو

ولإعطاء فكرة عن الدقة الهندسية للنموذج الناتج عن تسجيل الفيديو، قمنا باستخدام البرنامج CloudCompare لمقارنة هذا النموذج مع النموذج الناتج عن الصور الساكنة وذلك عن طريق حساب المسافات الفاصلة بينهما، فوجدنا أن الفرق الأكبر في المسافات هو 0.907 mm وقيمة الخطأ المتوسط التريبع على فرق المسافات هو 0.0412 mm. نبين في الشكل (7) العلاقة بين قيم فروق المسافات بين النموذجين وعدد نقاط النموذج الناتج عن تسجيل الفيديو. نلاحظ من الشكل أن معظم النقاط متطابقة في النموذجين.

Approximate distances (106567 values) [8 classes]



الشكل (7). عدد نقاط نموذج عنصر الاختبار المنتظم الناتج عن تسجيل الفيديو كتابع لفرق المسافات بينه وبين النموذج الشبكي الناتج عن الصور الساكنة.

ثانياً: حساب حجم العنصر ذي الشكل غير المنتظم

يهدف هذا التطبيق إلى توضيح تأثير عدم انتظام شكل العنصر على الحساب الدقيق لحجمه انطلاقاً من الصور بطريقة الـ SfM، وهو معامل جديد يضاف إلى العوامل المؤثرة الأخرى التي عرضناها في المثال السابق.

قمنا بالنقاط 18 صورة للعنصر باستخدام نفس الهاتف النقال وبدقة تمييز عظمى وبحيث تغطي هذه الصور كل أجزاء العنصر، كما قمنا أيضاً بتسجيل مقطع فيديو للعنصر مدته 66 ثانية حاولنا خلاله تغطية كل أجزاء العنصر. قمنا لاحقاً بعد ذلك بتحويل هذا التسجيل إلى لقطات بحيث اقتطعنا لقطة كل 1 ثانية فحصلنا على 66 لقطة تم استخدامها كلها في عملية النمذجة.

قمنا بعد ذلك، بإدخال اللقطات (الساكنة والمقتطعة من تسجيل الفيديو) إلى برنامج المعالجة ومن ثم قام البرنامج وبشكل آلي بحساب مواقع آلة التصوير وغمامة النقاط الكثيفة والنموذج الشبكي. وأخيراً، تم إدراج المسافة المرجعية والتي تبلغ 30 cm لوضع النموذج الناتج على المقياس (الشكل (8) والجدول (4)). في الواقع، لم نتمكن من استخدام نقاط ضبط نظراً لصغر حجم العنصر المدروس.

نواتج معالجة تسجيل الفيديو

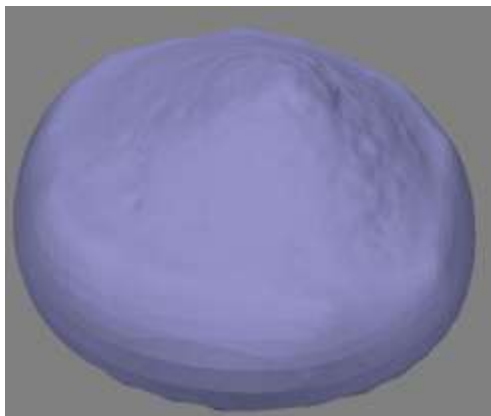


غمامة النقاط الكثيفة

نواتج معالجة الصور الساكنة



غمامة النقاط الكثيفة



النموذج الشبكي



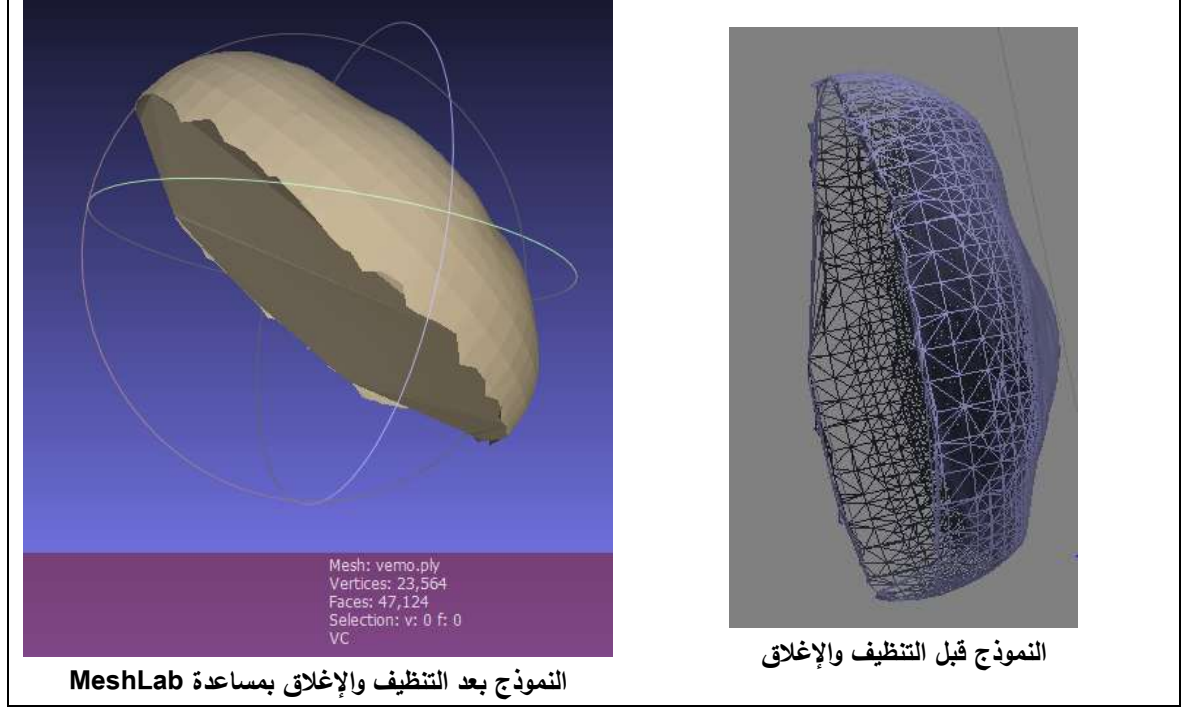
النموذج الشبكي

(الشكل 8). غمامات النقاط الكثيفة والنماذج الشبكية لعنصر الاختبار غير المنتظم.

الجدول (4). مدخلات ونواتج المعالجة للعنصر غير المنتظم.

عدد وجوه النموذج الشبكي	عدد نقاط الغمامة الكثيفة	دقة تمييز الصورة (Megapixels)	عدد الصور المستخدمة	
490130	2647345	13.00	18	الصور الساكنة
47124	22703	0.31	66	تسجيل الفيديو

كما أوضحنا سابقاً، فإن النماذج الشبكية السابقة تعاني من وجود بيانات شاذة إضافةً إلى إنها نماذج غير مغلقة وبالتالي لا يمكن حساب حجمها. ولتجاوز هذه المشاكل، قمنا بتصدير هذه النماذج (لحالي الصور الساكنة وتسجيلات الفيديو) إلى البرنامج MeshLab ومن ثم تم استخدام الأدوات الموجودة فيه لإزالة الضجيج في البيانات وإعادة بناء النماذج الشبكية المغلقة (الشكل (9)).



الشكل (9). معالجة النموذج الشبكي لعنصر الاختبار غير المنتظم داخل MeshLab.

تم بعد ذلك تصدير النماذج إلى البرنامج CloudCompare وذلك لحساب حجومها. نبين في الجدول (5) حجوم هذه النماذج المحسوبة مع مقارنتها مع الحجم الحقيقي للجسم ذي الشكل غير المنتظم. نلاحظ من الجدول (5) أن:

1. الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من الصور الساكنة أقل من الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من لقطات الفيديو. إن هذا يعود إلى دقة التمييز الكبيرة للصور المستخدمة والتي مكنتنا من توليد العدد الكبير لوجوه النموذج الشبكي (الشكل (8)) مما ساعد على استقرار أفضل لشكل العنصر ثلاثي الأبعاد وبالتالي إلى تحديد حجمه بشكل أدق. ولكن إذا قارنا قيمة النسبة المئوية لهذا الفرق مع تلك الخاصة بالشكل المنتظم، نجد أنها كبيرة وهذا عائد إلى سببين أساسيين هما:

a. عدم انتظام شكل العنصر المدروس والذي يعتبر عاملاً مهماً يصعب عملية استقراره انطلاقاً من غمامة النقاط الكثيفة من قبل خوارزميات النمذجة.

b. عدم توفر نقاط ضبط والاعتماد فقط على مسافة مرجعية. إن لهذا العامل تأثيراً مباشراً على دقة تحديد مواقع آلة التصوير وبالتالي على دقة النقاط ثلاثية الأبعاد المقطعة من الصور (ساكنة أو فيديو).

2. الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من صور الفيديو أكبر من الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المحسوب من الصور الساكنة ولكن ليس كثيراً. في الحقيقة، لقد ساعد العدد الكبير من الصور المقطعة من

الفيديو (مقارنةً بعدد الصور الساكنة) على الوصول على هذه النتيجة وذلك بالرغم من دقة تمييزها المنخفضة جداً والذي أثر على عدد وجوه النموذج الشبكي الناتج (الشكل (8)).

الجدول (5). مقارنة الحجم المحسوبة من الصور وتسجيلات الفيديو مع الحجم الحقيقي للعنصر غير المنتظم.

النسبة المئوية للفرق	الفرق (سنتيمتر مكعب)	الحجم (سنتيمتر مكعب)	الحقيقي
		3231.01	
7 %	214.90	3446.00	المحسوب من الصور
9 %	303.69	2927.40	المحسوب من تسجيلات الفيديو

الاستنتاجات والتوصيات

بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المقدمة حول استخدام طريقة SfM في حساب حجوم الأجسام ذات الشكل المنتظم والأجسام ذات الشكل غير المنتظم باستخدام الصور وتسجيلات الفيديو التي يمكن الحصول عليها باستخدام الهواتف النقالة مع برمجيات منخفضة التكاليف أو مجانية، نستنتج مايلي:

1. تشكّل الهواتف النقالة أداةً جديدة، منخفضة التكاليف وفعّالة في الحصول على مدخلات النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر وذلك من خلال الصور وتسجيلات الفيديو التي تؤمنها.
 2. لقد بيّنت التطبيقات التي ناقشها هذا البحث أنه يمكن لطريقة الـ SfM أن تشكّل حلاً بديلاً موثوقاً ومنخفض التكاليف للطرائق المستخدمة في توليد النماذج الرقمية ثلاثية الأبعاد السطوح (أو النماذج الشبكية) للعناصر والتي تستخدم عادةً تجهيزات خاصة وبرمجيات مكلفة. هذا النوع من النماذج ضروري لحساب حجوم العناصر.
 3. تعتبر البرامج التجارية منخفضة التكاليف والتي تمثل طريقة الـ SfM والبرمجيات المجانية المستخدمة لمعالجة غمامات النقاط وبناء النماذج الشبكية منها، أدوات واعدة جداً في مجال التعبير الدقيق عن العناصر ثلاثية الأبعاد واقتطاع الكثير من البيانات الهندسية الهامة ومنها الحجم.
 4. إن أهم العناصر التي تتحكم بنوعية النماذج الشبكية للعناصر، وبالتالي بحساب حجومها الدقيقة، هي دقة تمييز الصور التي تغطي العناصر وعددها ونوعية معطيات الضبط وكذلك شكل العنصر المراد حساب حجمه.
 5. يمكن اعتبار تسجيلات الفيديو حلاً بديلاً عن الصور الساكنة في النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر وذلك في حال توفر فائض كبير من الصور ونوعية جيدة من معطيات الضبط. إن هذين الشرطين أساسيين من أجل تجاوز مشكلة دقة التمييز المنخفضة للصور المقطعة من تسجيلات الفيديو.
- يمكن لنا في نهاية هذا البحث أن نوصي بالاستفادة من المنهجية المقترحة في البحث في بناء النماذج ثلاثية الأبعاد للعناصر وحساب الحجوم منها وتعميمها على العناصر الكبيرة (كالردم والحفر والخزانات) والتي تتطلب تطبيق طرائق مساحية مكلفة وطويلة. كما نوصي بالاستفادة من الإمكانيات المتنامية لآلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة والبرمجيات مفتوحة المصدر في معالجة مسألة حساب حجوم العناصر. وفي حال استخدام تسجيلات الفيديو، نوصي بزيادة عدد اللقطات وبعتماد معطيات ضبط دقيقة. إن هذه التسجيلات ستكون فعّالة خاصة في تغطية العناصر الكبيرة، إضافةً إلى سرعة الحصول عليها مقارنةً بالصور الساكنة. ومن ناحية أخرى، نوصي بمعايرة آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة وذلك لزيادة الدقة الهندسية للنماذج الشبكية ثلاثية الأبعاد التي تشتق من صورها.

المراجع

- [1] WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J., REYNOLDS, J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 2012, 179, 300-314, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [2] MCKEAN, J., ROERING, J., Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 2004, 57, 331-351, DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00164-8.
- [3] BARAZZETTI, L., BINDA, L., SCAIONI, M., TARANTO, P., Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the 'G1' temple in Myson, Vietnam. *Journal of Cultural Heritage* 2011, 12, 253-262, DOI: 10.1016/j.culher.2010.12.004.
- [4] TSUI, O. W., COOPS, N. C., WULDER, M. A., MARSHALL, P. L., Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. *Remote Sensing of Environment* 2013, 139, 340-352, DOI: 10.1016/j.res.2013.08.012.
- [5] REMONDINO, F., EL-HAKIM, S., Image-based 3D modeling: a review. *The Photogrammetric Record* 2006, 21, 269–291, DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x.
- [6] ALSADIK, B., REMONDINO, F., MENNA, F., GERKE, M., VOSSELMAN, G., Robust extraction of image correspondences exploiting the image scene geometry and approximate camera orientation. *3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 2013, Trento, Italy. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XL-5/W1.
- [7] WU, C., Towards Linear-time Incremental Structure from Motion. *IEEE 2013. International Conference on 3D Vision*, 2012, Seattle, WA, USA, 127-134, DOI: 10.1109/3DV.2013.25.
- [8] WU, C., AGARWAL, S., CURLESS, B., SEITZ, S. M., Multicore Bundle Adjustment. In: *IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Colorado Springs, USA, 3057 – 3064, DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995552.
- [9] GIENKO, G.A., TERRY, J.P., Three-dimensional modeling of coastal boulders using multi-view image measurements. *Earth surface processes and Landforms* 2013, 39, 853-864, DOI: 10.1002/esp.3485.
- [10] JAVERNICK, L., BRASINGTON, J., CARUSO, B., Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 2014, 213, 166-182, DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.01.006.
- [11] CONTEXTCAPTURE., 2017. "ContextCapture User Manual. Bentley Systems.