

## Evaluation of the Effectiveness of Open Source Software in Image-Based 3D Modeling

Dr. Omar AL KHALIL\*

Dr. Ahmad ALI \*\*

Gaith Assad\*\*\*

(Received 21 / 9 / 2022. Accepted 15 / 11 / 2022)

### □ ABSTRACT □

3D modeling software that come with a 3D laser scanner is usually expensive and requires a high level of expertise. On the other hand, image-based modeling software offers a cheaper alternative that can be handled with relative ease. Free and open source software is also available that has the ability to produce high quality data for 3D modeling. However, contemporary academic research rarely provides survey-based feature lists or a critical examination of the potential workflows of these programs, nor does it usually provide guidance for non-experts interested in learning, developing, and sharing 3D content on a budget. To address these problems, a group of open source software is studied in this paper based on its features, workflow, 3D processing time and accuracy.

In this paper, a set of real data was used to compare and evaluate two open source software (VisualSfM and Mishroom) based on the point clouds they produce. To do this, these clouds were compared with a reference cloud generated using commercial 3DF Zephyr Aerial software. The results showed that the use of these software in 3D modeling gives promising results, accurate with its ease of use. This research will help non-expert users understand the topic of photogrammetry and determine the most suitable software for producing low-cost and high-quality 3D image-based models.

**Keywords:** 3D modelling, Open Source Software, Point clouds, Photogrammetry.

---

\* Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. [omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy](mailto:omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy)

\*\* Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. [ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy](mailto:ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy)

\*\*\* Postgraduate Student (Master), Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. [ghaith.assad@tishreen.edu.sy](mailto:ghaith.assad@tishreen.edu.sy)

## تقييم فعالية البرامج مفتوحة المصدر في النمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على الصور

د. عمر محمد الخليل\*

د. أحمد سلمان علي\*\*

غيث نديم أسد\*\*\*

(تاريخ الإيداع 21 / 9 / 2022. قُبِلَ للنشر في 15 / 11 / 2022)

### □ ملخص □

عادةً ما تكون برامج النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر المرفقة مع الماسح الليزري ثلاثي الأبعاد باهظة الثمن وتتطلب مستوى عالٍ من الخبرة. لذلك يمكن استخدام برامج النمذجة القائمة على الصورة التي تعتبر بديلاً أرخص وسهل الاستخدام. تتوفر من هذه البرامج برامج مجانية ومفتوحة المصدر تمكننا من الحصول على بيانات ذات نوعية مناسبة للنمذجة ثلاثية الأبعاد. ومع ذلك، نادراً ما تقدم الأبحاث الأكاديمية المعاصرة فحصاً نقدياً أو تحديداً لميزات هذه البرامج بحيث يكون مبنياً على الاستقصاء أو تفصيلاً لتدفقات العمل المحتملة لها، كما لا توجه أو ترشد المستخدمين غير الخبراء المهتمين بتعلم وتطوير ومشاركة المحتوى ثلاثي الأبعاد بميزانية محدودة. لمعالجة هذه المشكلات، تم في هذا البحث دراسة مجموعة من البرمجيات المفتوحة المصدر بناءً على ميزات وسير العمل فيها ووقت المعالجة ثلاثية الأبعاد ودقتها.

تم في هذا البحث استخدام مجموعة من البيانات الحقيقية لمقارنة وتقييم برنامجين من البرامج المفتوحة المصدر (VisualSfM و Meshroom) بناءً على الغمات النقطية التي ينتجها. للقيام بذلك تمت مقارنة هذه الغمات مع غمات مرجعية ناتجة عن استخدام برنامج تجاري هو 3DF Zephyr Aerial. بينت النتائج أن استخدام هذه البرامج في النمذجة ثلاثية الأبعاد يعطي نتائج واعدة، دقيقة مع تميزها بسهولة الاستخدام. إن هذا البحث سيساعد المستخدمين غير الخبراء على فهم موضوع المسح التصويري وتحديد أنسب البرامج لإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد القائمة على الصور ذات تكلفة منخفضة ونوعية عالية.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة ثلاثية الأبعاد، برامج مفتوحة المصدر، غمات النقاط، المساحة التصويرية.

\* أستاذ . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

[omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy](mailto:omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy)

\*\* أستاذ مساعد . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

[ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy](mailto:ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy)

\*\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

[ghaith.assad@tishreen.edu.sy](mailto:ghaith.assad@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

لقد أصبح إنشاء نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد للمواقع والمعالم وللحفريات الأثرية وللأبنية والمناظر الطبيعية، أمراً شائعاً في مجالات مثل توثيق التراث، إعادة الإعمار الافتراضي، الإظهار، فحص موقع الجريمة، تخطيط المشاريع وكذلك لبناء الواقع المعزز والافتراضي. وعادةً ما تتطلب أساليب النمذجة التقليدية القائمة على الهندسية - Geometry based باستخدام برامج مثل Maya، Blender أو 3D Studio Max خبرةً كبيرة ووقتاً وجهداً كبيرين. ومن الصحيح أن استخدام الأجهزة (الماسحات الليزرية Laser scanners، الدرونات Drones، الخ) من أجل إعادة البناء ثلاثية الأبعاد للعناصر الحقيقية، سهلت على المختصين عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد، ولكنها مكلفة بالإضافة إلى أنها تتأثر بخصائص المواد المنمذجة والظروف البيئية المحيطة [1].

إن ما سبق يوضح الحاجة الماسة لوجود أدوات تسمح لغير المختصين بإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد بسهولة، خاصةً لأغراض التوثيق والعروض البصرية. ولتلبية هذه الحاجة، ظهرت بعض برمجيات النمذجة ثلاثية الأبعاد التجارية، والمجانية والمفتوحة المصدر Open source القائمة على الصور Image-based. وهي تنتج غمامة نقطية ثلاثية الأبعاد 3D point cloud انطلاقاً من صور غير معايرة حيث يحدد البرنامج الخصائص الهندسية للعناصر من الصور وهي عملية تتطلب ربط النقاط المرجعية عبر سلسلة من الصور. وهنا نحتاج إلى صور ذات نوعية عالية ويعدد مناسب من أجل السماح بمعالجة السطوح وربطها وتثليث السمات البصرية ومن ثم بناء الغمامة ثلاثية الأبعاد. تعتبر تقنية اقتطاع البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) واحدة من أكثر التقنيات المطبقة في مختلف برامج النمذجة القائمة على الصور، وهي تقنية لغير المختصين بالمسح التصويري تولّد نماذج عالية الدقة بسرعة وسهولة من خلال استخدام صور غير معايرة تم التقاطها بواسطة آلات تصوير منخفضة الكلفة ودون الحاجة إلى أي أجهزة متخصصة أو ظروف إضاءة مصممة بعناية. عادةً ما يمر تدفق العمل بتقنية الـ SfM بالخطوات السبعة التالية لإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد:

1. اكتساب الصور Image acquisition.
2. استنساخ السمات والمطابقة والتثليث (أو مرادفة الصور Align photos).
3. إعادة بناء غمامة النقاط المبعثرة Sparse cloud والتعديل بالحزم Bundle adjustment.
4. الربط الكثيف للتوافقات بين السمات Dense correspondence matching (أو توليد غمامة النقاط الكثيفة Dense cloud).
5. بناء الشبكة Mesh وتوليد السطح.
6. توليد النسجة Texture.
7. تحرير الغمامة والنموذج السطوح أيضاً (في بعض حزم البرامج [2]).

لقد تم القيام بالعديد من الدراسات الخاصة ببرمجيات النمذجة القائمة على الصورة والتي تناولت النقاط التالية:

1. تحليل فعالية البرامج [3-5].
2. تحليل دقة النمذجة ثلاثية الأبعاد في هذه البرامج [6-8].
3. الخوارزميات المستخدمة في هذه البرامج [9].
4. قابلية هذه البرامج للتوسع [1, 9, 10].
5. مناقشة تدفق العمل في هذه البرامج [11, 12].

في كل الأحوال، من النادر أن نجد دراسات تتعلق بالاستخدام العملي الأفضل لهذه البرامج أو بتدفق العمل المثالي لها والذي يمكن اعتماده من قبل المستخدمين من أجل إنشاء النماذج ثلاثية الأبعاد بسهولة وبشكل مجاني أو منخفض التكلفة. ولهذا، فإننا نقدم في هذا البحث دراسة مقارنة لحزمتين من البرمجيات مفتوحة المصدر والتي تم اختيارها على أساس الكفاءة، استقلالية النظام الأساسي، قابلية التوسع، صيغ الإخراج، الدقة، سهولة الاستخدام والتثبيت، وزمن المعالجة.

### أهمية البحث وأهدافه:

- تكمن أهمية البحث في محاولته مقارنة تدفقات العمل المعتمدة في مجموعة متنوعة من برمجيات SfM التجارية والمجانية ومفتوحة المصدر وفي أنه يقدم مقارنة شاملة لدقة النمذجة الخاصة بها لمساعدة المستخدمين ذوي المعرفة التقنية المحدودة والذين يهتمون بنمذجة العناصر لأغراض التوثيق والإظهار. يمكن أن تلخص أهداف البحث بالنقاط التالية:
- 1- القيام بمراجعة تحليلية واسعة للدراسات المرجعية الخاصة بتدفقات العمل في برمجيات الـ SfM.
  - 2- اقتراح معايير لاختيار البرنامج الأنسب لغير المختصين بالمسح التصويري.
  - 3- مناقشة دقة وكمايلية منتجات البرامج المدروسة من خلال استخدامها في عملية نمذجة لواجهة بناء يمثل نسخة من بناء تاريخي مع تثبيت الإعدادات الافتراضية لهذه البرامج وهو عادةً ما يستخدمه غير المختصين.

### طرائق البحث ومواده:

#### 1- مراجعة للنمذجة القائمة على الصور ولبرمجيات SfM

أصبحت النمذجة القائمة على الصور في الآونة الأخيرة مجال اهتمام متزايد في الأوساط الأكاديمية حيث تم إنجاز عدد كبير من الأبحاث حول الموضوعات ذات الصلة بهذه النمذجة. يمكن إنتاج الغمامة ثلاثية الأبعاد فقط عندما يتم إنشاء العلاقات بين الصور بشكل مناسب. في الواقع، يوجد العديد من الأبحاث التي تصف الإنتاج الإجمالي للنماذج ثلاثية الأبعاد على شكل سلسلة من الصور المعايير أو غير المعايير [13-15] واصفةً تفاصيل التقنيات المختلفة المطبقة لتحقيق درجة عالية من الدقة [6, 1].

لقد نجح الباحثون في تطوير طرائق مختلفة لإنتاج النماذج ثلاثية الأبعاد من الصور. فعلى سبيل المثال، طور Debevec وزملاؤه [16] ما يسمى بنظام الواجهة Façade system وأنتج نموذجاً ثلاثي الأبعاد لحرم معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا من خلال مشروع "MIT City Scanning Project" وذلك من خلال سلسلة من الصور الملتقطة من الشارع. كما اقترح Xiao وزملاؤه [17] أسلوباً شبه آلي قائم على الصورة لإعادة بناء النماذج ثلاثية الأبعاد للواجهات. إضافةً إلى ما سبق قدم Brown وزملاؤه [18] تقنية أخرى تعتمد على النمذجة القائمة على الصور استخدمت تحديد معاملات آلة التصوير لإنتاج هندسية المشهد ثلاثي الأبعاد. من ناحية أخرى، طور Snively وزملاؤه [19] البرنامج Photo Tourism (سمي لاحقاً باسم Photo Synth بواسطة Microsoft) استناداً إلى أبحاث Brown مع زيادة قابلية التوسع. كما اقترح Agarwala [20] أسلوباً آخر يعتمد على الصور البانورامية Panoramas للمشاهد شبه المستوية لإنتاج النموذج ثلاثي الأبعاد. وعمل بعض الباحثين على تقييم برامج المسح التصويري [11-14]، لكن أبحاثهم ركزت في الغالب على دقة النمذجة.

من النادر العثور على مقالات تناولت مقارنة لمنهجية العمل من أجل تحديد أفضل الممارسات، واستكشاف طرق التعلم الفعالة والاستخدامات المخصصة لعامة المستخدمين الذين يملكون معرفة تقنية محدودة. لقد تمت ملاحظة هذه المشكلة

المهمة أيضاً من قبل Remondino وزملائه [21] و Deseilligny وزملائه [7] و De Reu وزملائه [22]. في كل الأحوال، عمل Ben Nausner [23] على المشروع المسمى Virtual Nako حيث عرض منهجية العمل المطبقة لاكتساب وإظهار المشهد ثلاثي الأبعاد والذي يمكن أخيراً تحميله إلى Google Earth للعرض العام. من ناحية أخرى، وصف Sauerbier [24] منهجية عمل للمعالجة التصويرية للصور الجوية لتوليد نموذج ثلاثي الأبعاد للموقع الأثري Tucume الموجود في البيرو، كما قدم Koutsoudis [12] وزملاؤه منهجية عمل "متعددة الاستخدامات" لتوليد نماذج ثلاثية الأبعاد تعتمد على مجموعة من البرامج مفتوحة المصدر، حيث استخدم ثمانى تطبيقات برمجية مختلفة لدمج سير العمل وأكد أن هذا النهج يمكن أن يكون مفيداً لغير المختصين. وأخيراً، وصف Deseilligny وزملاؤه [7] منهج عمل آلي للنمذجة ثلاثية الأبعاد قائم على الصور وذلك من أجل رقمنة دقيقة ومفصلة للقطع الأثرية على أساس برمجيات مفتوحة المصدر.

يؤكد مطورو برامج النمذجة القائمة على الصور فعالية هذه البرامج من حيث التكلفة مقارنة بأساليب المسح بالليزر التقليدية وبأنها تستطيع توفر نظام آلي لإنشاء النماذج ثلاثية الأبعاد بدقة كبيرة ومع ذلك، يتم تحمّل تكاليف للحصول على تراخيص البرمجيات التجارية كما أن مستوى معيناً من المهارة التقنية والمعرفة هو أمر ضروري. عرض كل من Boochs وزملائه [28] وكذلك Lindstaedt و Kersten [29] طرقاً مجانية أو منخفضة التكلفة لإعادة البناء ثلاثية الأبعاد للعناصر التفصيلية (كالعناصر الأثرية والتراثية)، لكن الأساليب المقدمة كانت تستهدف المستخدمين التقنيين. لقد أصبحت برامج النمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على مبادئ الـ SfM مستخدمةً على نطاق واسع في الآونة الأخيرة [30]. ولكن معظم الأبحاث التي ناقشت المقارنة المعيارية لإعادة البناء ثلاثية الأبعاد القائمة على الـ SfM ركزت فقط على حلول البرمجيات المجانية والمفتوحة المصدر. وبالرغم من وجود دراسات قليلة ناقشت كل من VisualSfM [8, 31, 21, 11] و Bundler/PMVS [21, 13, 11]، فإننا نادراً ما نجد دراسة تتوجه للمستخدمين المبتدئين أو المستخدمين غير الخبراء لدعمهم في إعادة بناء النماذج ثلاثية الأبعاد.

## 2- معايير اختيار برنامج النمذجة SfM

تتوافر مجموعة متنوعة من برامج النمذجة ثلاثية الأبعاد المعتمدة على الـ SfM بدءاً من الأنظمة البسيطة وحتى الحزم الاحترافية المتطورة. ومع الأخذ في الاعتبار الفئات المستهدفة التي تملك ميزانية محدودة ومستوى محدود من المهارات والتي تتطلب بيئة بناء نموذج قوية وسهلة التعلم وقابلة للتطوير، فإننا نقترح المعايير التالية لاختيار حزمة البرمجيات التجارية، المجانية والمفتوحة المصدر:

- تكلفة منخفضة أو مجانية.
  - منهجية عمل بسيطة مع سهولة تنصيب البرنامج وتعلمه واستخدامه.
  - توافر واجهة المستخدم الرسومية (GUI).
  - دعم المساحة التصويرية القريبة Close range photogrammetry واقتطاع البنية من الحركة (SfM).
- كما نؤكد هنا على عدم استخدام البرامج التجارية المجانية ذات الوظائف/القدرات المحدودة والخدمات عبر الإنترنت المستندة إلى التخزين السحابي.

## 3- البرامج المختبرة في البحث

قبل أن نقرر ما هي البرامج التي سيقوم البحث باختبارها قمنا ببحث موسع يخص برمجيات النمذجة القائمة على الصور وعلى مبادئ الـ SfM المتوافرة حالياً، وتم تحضير قائمة ببرامج النمذجة ثلاثية الأبعاد تضم ما يزيد عن ثمانية

وتسعين برنامجاً، بما في ذلك البرامج المستقلة والمكونات الإضافية التي يمكنها إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد من الصور. من الفئة التجارية، تم اختيار البرنامج 3DF Zephyr Aerial نظراً لسعره المنخفض (الإصدار القياسي التعليمي) والدقة في إنتاج غمامات النقاط ثلاثية الأبعاد. أما من الفئة مفتوحة المصدر، فقد اخترنا برنامجين هما البرنامج الأكاديمي VisualSfM والبرنامج Meshroom لأنهما يدعمان أيضاً النمذجة بتطبيق مبادئ الـ SfM. ونشير هنا إلى الدراسة لا تشمل مقارنة لبيئات الإنتاج ثلاثية الأبعاد وأنه تم استخدام الإعدادات الافتراضية في الغالب. يوضح الجدول (1) مواصفات البرامج المختبرة في هذا البحث.

الجدول (1). مواصفات البرامج المختبرة.

البرنامج	نوعه	نظام التشغيل	نوع الصور	السعر (دولار)	صيغ التصدير
3DF Zephyr Aerial	تجاري	Microsoft windows	صور قريبة وجوية	4200	.obj, .3ds, .dae, .ply, .stl, .dxf, .fbx, .wrl, .pdf, .u3d, Ply, .nvm, .out, VRML
VisualSfM	أكاديمي - مفتوح المصدر	Linux, macOS, Microsoft Windows	صور قريبة	مجاني	.ply, .out
Meshroom	مفتوح المصدر	Microsoft windows	صور قريبة	مجاني	.ply, .obj

أما الجدول (2) فيوضح سمات النمذجة المدعومة من قبل البرامج المختبرة.

الجدول (2). سمات النمذجة التي تدعمها البرامج المختبرة.

البرنامج	سمات النمذجة المدعومة				
	غمامة مبعثة	غمامة كثيفة	نموذج شبكي	نسجة	تحرير
3DF Zephyr Aerial	نعم	نعم	نعم	نعم	نعم
VisualSfM	نعم	نعم	نعم	لا	لا
Meshroom	نعم	نعم	نعم	نعم	لا

#### 4- العنصر المدروس

المنشأ المدروس هو منزل تراثي يقع في منطقة دمسخو ضمن محافظة اللاذقية (الشكل (1)) وهو عبارة عن بناء من الحجر الرملي يتألف من طابقين وسطح مائل من القرميد الأحمر. تبلغ أبعاد المنشأ المدروس (15×19 م). وارتفاعه 6.5 م. تمت الدراسة على الواجهة الغربية من المنزل (أبعادها 15×6.5 م).





الشكل (1). المنشأ المدروس.

## 5- اكتساب البيانات

الهدف من هذه المرحلة هو الحصول على المدخلات وهي مرحلة يدوية وتضم العمليات التالية:

- ✓ تأمين معطيات الضبط والتي تأخذ شكل نقاط قاعدة مساحية ونقاط ضبط على مختلف أقسام الواجهة الغربية، حيث يتطلب إنجاز هذه المرحلة القيام بأعمال جيوديزية (أفقية وشاقولية) تقليدية.
- ✓ النقاط صور باستخدام آلة تصوير رقمية.

تم زرع قاعدة تؤمن تغطية كاملة للواجهة بحيث يمكن رصد كل نقطة من هذه الواجهة من نقطتي هذه القاعدة. أما بالنسبة لنقاط الضبط على جسم الواجهة، فالهدف منها هو حساب هندسية النموذج وتقييم دقته الهندسية. قمنا بتأمين وجو 6 نقاط ضبط على الأقل وسطياً في مناطق تداخل الصور بحيث تكون موزعة بشكل طولاني موحد من هذه المناطق، وذلك لضمان استقرار حساب بلوك الصور رياضياً. أما فيما يتعلق بالنوع (نقاط ضبط طبيعية أو صناعية)، فقد استخدمنا نقاطاً طبيعية. يوضح (الشكل (2)) توزيع بعض نقاط الضبط على جزء من الواجهة.



الشكل (2). توزيع نقاط الضبط على الواجهة.

تم إجراء القياسات الحقلية المساحية للقاعدة والمراسد ونقاط الضبط على الواجهة باستخدام جهاز المحطة الشاملة Leica FlexLine TS09 (الشكل (3))، حيث تم قياس الاتجاهات بدقة  $3''$  للاتجاه الواحد، والمسافات بدقة  $2\text{ mm}$  للمسافة الواحدة.



الشكل (3). جهاز المحطة الشاملة Leica FlexLine TS09.

أما فيما يخص الصور الخاصة بالواجهة، تم التقاط الصور باستخدام آلة تصوير من نوع SONY Ilce-7m3 (الشكل (4))، ذات دقة تمييز 24.2 Mega pixel.



الشكل (4). آلة التصوير SONY Ilce-7m3.

والجدول التالي يوضح مواصفات آلة التصوير المستخدمة.

الجدول (3). مواصفات آلة التصوير المستخدمة.

SONY Ilce-7m3	
Exmor R® CMOS	نوع المستشعر
24.2 Mp	الدقة
24 mm	البعد المحرقي

## النتائج والمناقشة:

### 1- حساب الإحداثيات الأفقية والشاقولية لنقاط الضبط على الواجهة

تم استخدام نقاط القاعدة في حساب الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لنقاط الضبط الطبيعية على الواجهة، حيث تم التعامل معها كما يتم التعامل مع نقاط الرفع التفصيلي أي أننا حسبنا إحداثياتها بالطريقة المباشرة (زاوية ومسافة وفرق ارتفاع) انطلاقاً من الأرصاد المنفذة من نقطتي القاعدة. وبما أنه يمكن رؤية كل من هذه النقاط من النقطتين السابقين، فقد تم



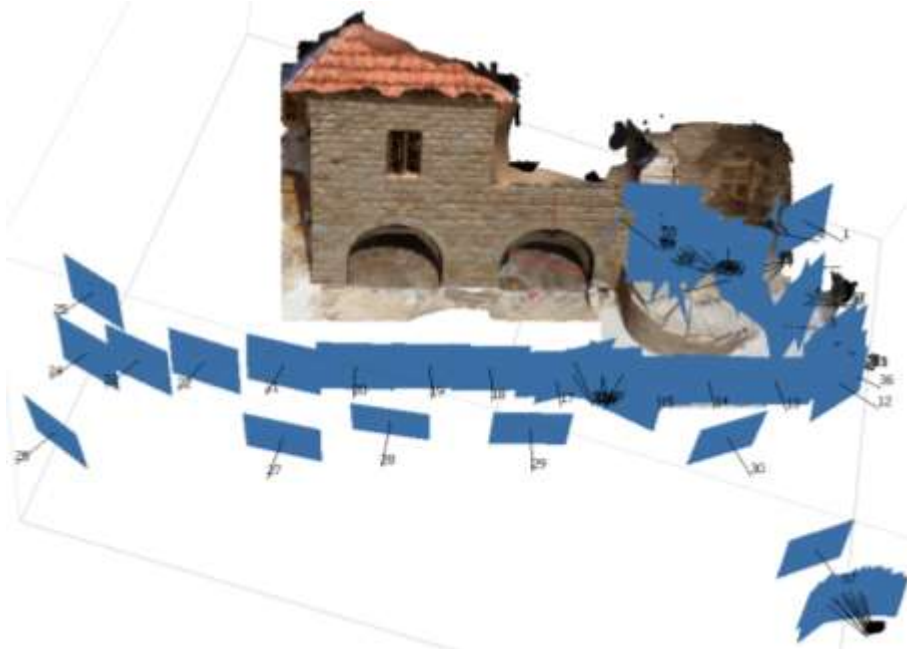
اعتماد القيم المتوسطة لهذه الاحداثيات. يبين الجدول (4)، الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لنقاط القاعدة ولبعض نقاط الضبط على جسم الواجهة ومناسيها.

جدول (4). الإحداثيات النهائية ثلاثية الأبعاد لبعض لنقاط الضبط.

رقم النقطة	X (m)	Y (m)	Z (m)
A	100	100	160
B	82.9665	81.6645	162.2777
C	111.2804	65.7544	162.6514
D	125.5018	92.74	161.9219
WF1	100.5919	86.534	165.4707
WF2	101.708	89.2542	165.3685
WF3	102.5847	91.4223	167.4206
WF5	101.8162	89.5442	166.7147

## 2- التقاط الصور للواجهة

عند التقاط الصور، حرصنا على ظهور كل نقطة من الواجهة على صورتين على الأقل. ومن أجل الحفاظ على زوايا قريبة من القائمة بين الصور قمنا بالفصل الجيد بين محطات جهاز التصوير أفقياً وشاقولياً. أي أننا لم نجعل كل المحطات في مستو واحد. قمنا أيضاً بإحاطة الواجهة من الأعلى والأسفل. كما قمنا بإضافة لقطات متعامدة للواجهة وذلك لأغراض الإرجاع وتصنيع الموزايك الصوري في حالة الحاجة إلى هذا النوع من المنتجات. وخلال عملية التصوير قمنا أيضاً بالاقتراب من العنصر للحصول على تفاصيل أكبر وكذلك بالابتعاد كثيراً من أجل تطويق العنصر أو محيطه. في نهاية عملية التصوير حصلنا على 69 صورة ويوضح (الشكل (5)) مواقع التقاط هذه الصور.



الشكل (5). مواقع التقاط الصور.

## 3- دراسة تدفق العمل في البرامج المختبرة

## • البرنامج 3DF Zephyr Aerial

البرنامج 3DF Zephyr هو برنامج تجاري منخفض الكلفة تم تطويره من قبل شركة 3Dflow الإيطالية. يسمح هذا البرنامج بالبناء الآلي والدقيق للنماذج ثلاثية الأبعاد الصورية الواقعية Photorealism models انطلاقاً من صور رقمية لامترية للعنصر وهو متوافر بعدة إصدارات. يعمل هذا البرنامج تحت نظم التشغيل Windows، Mac OS، و Linux على حاسب شخصي وبهذا تظل كل البيانات مع المستخدم. في بعض الحالات يكون من المستحيل إنجاز النموذج ثلاثي الأبعاد لكل العنصر من محاولة واحدة ولتجاوز هذه الصعوبة، يمكننا البرنامج من تعريف عدة مشاريع نمذجة ومن ثم دمج النتائج ضمن مشروع واحد.

لاستخدام البرنامج يجب النقاط صور تغطي كامل العنصر ويمكن استخدام الصور مع قناع masked photographs أو بدون قناع ضمن تدفق العمل (الخطوة (1)) كما أن مراصفة أو توجيه الصور Image alignment ضروري من أجل القيام بالخطوة (2)). في كل الأحوال، يوصى باستخدام الصور مع قناع من أجل كل العناصر غير المهمة في الصور المصدرية للحصول على نتائج نمذجة أفضل. يقوم 3DF Zephyr في الخطوة (3) بحساب الصور وبناء الهندسية (بنشأ غمامة النقاط) للمشاهد. يمكن للمستخدمين تحرير وتنظيف العناصر الزائدة قبل بناء النموذج الشبكي. كما يمكن للغمامة الناتجة عن الخطوة الثالثة (3) أن تكون منخفضة الكثافة، متوسطة الكثافة أو عالية الكثافة وبناء عليها يتم حساب النموذج الشبكي الموافق (الخطوة (4)). يمكن التخلص من الهندسية غير المرغوب فيها في هذا النموذج بعمليات تحرير قبل البدء بعملية بناء النسجة (الخطوة (5))، كما يمكن للمستخدم تطبيق خطوات إضافية مثل إغلاق الثقوب (الخطوة (6)) في النموذج وتصدير النموذج.



الشكل (6). تدفق العمل في 3DF Zephyr.

يمكن إضافة النسجة إلى النموذج الشبكي الناتج بأقل جهد من قبل المستخدم وذلك بترك الأوضاع الافتراضية، كما يمكن تصدير النماذج في صيغ متعددة (OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, PLY, FBX, DXF, PDF) وذلك من أجل معالجة وتحرير وإظهار لاحق.

## • البرنامج VisualSfM

هو برنامج أكاديمي مفتوح المصدر يمكن له أن يعمل مع نظم التشغيل Windows، Mac OS، و Linux. لا يتطلب هذا البرنامج معرفة أية معلومات عن آلة التصوير المستخدمة وبدلاً من ذلك فهو يملك واجهة رسومية تتضمن Sift و GPU و PMVS. وهنا، تقوم Sift GPU بتحديد مواقع آلة التصوير في حين تنشأ الواجهة PMVS غمامة النقاط من

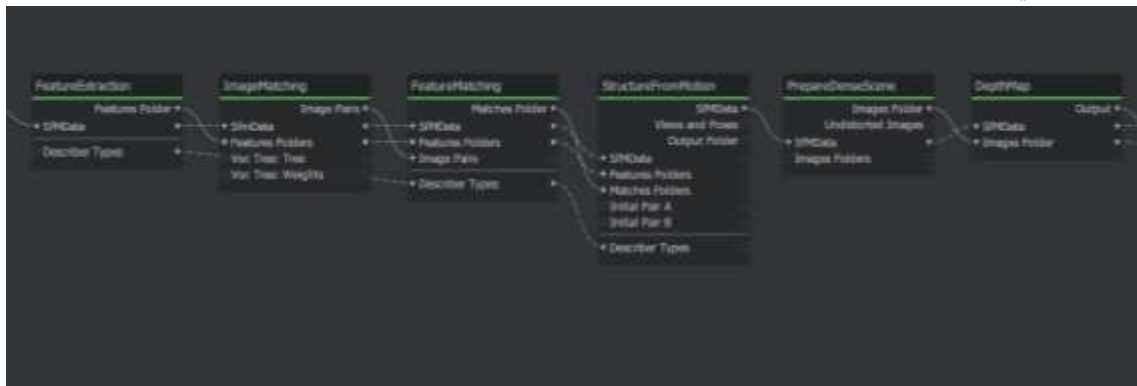
الصور المرتبطة. لا يمكننا البرنامج VisualSfM من إنجاز نمذجة ثلاثية الأبعاد كاملة ولكنه يزودنا بغمامة نقاط تحتاج إلى معالجة لاحقة. يبدأ تدفق العمل (الشكل (7)) مع البرنامج بإضافة الصور (الخطوة (1)) وذلك إما باستخدام ملف نصي يشير إلى مسارات تخزين الصور أو بالاستيراد المباشر لعدة صور. يمكن لهذا البرنامج أن يحدد وبشكل آلي كل المعاملات الخاصة بآلة التصوير التي التقطت الصور. في الخطوة (2) يستشعر البرنامج السمات في كل صورة ويجد الارتباطات Matches. يملك هذا البرنامج عدة خوارزميات من أجل استشعار السمة بما فيها الخوارزمية Scale Invariant Feature Transform (SIFT) (تحويل السمة المستقل عن المقياس) و Sift GPU (شكل مطور من SIFT) [11]. يتم تحويل الارتباطات المحددة في الخطوة السابقة إلى نقاط في الحيز ثلاثي الأبعاد (الخطوة (3)) بتطبيق التعديل بالحزم، كما يمكن توليد غمامة نقاط أشد كثافة باستخدام الأداة PMVS/CMVS (الخطوة (4)). تسمح هذه الخطوة بتخزين النتائج ضمن ملف من النوع \*.nvm\* يولده VisualSfM ويتم حفظه في مجلد اسمه \*.nvm.cmvs\* وينفذ الـ CMVS (Clustering view for Multi-view Stereo) كما يتم حفظ ملف من النوع \*.ply\* بشكل آلي في نفس الموقع.



الشكل (7). تدفق العمل في VisualSfM.

#### • البرنامج Meshroom

هو برنامج أكاديمي مفتوح المصدر يزودنا ببيئة عقدية Nodal environment للقيام بمهام محددة، ويتم التعبير عن المهام الفردية على شكل عقد يتم تركيبها بشكل رسومي نسميه بتدفق العمل Pipeline حيث تمثل كل عقدة أداة تم إدارتها من قبل الجهة المطورة AliceVision. وأهمية البنية العقدية لهذا البرنامج تنعكس عبر واجهته الرسومية حيث يسمح محرر (الشكل (8)) للمستخدم بمراقبة تقدم الحسابات، تحديد المعاملات، إظهار المخرجات وتعديل تدفق العمل بشكل تفاعلي.



الشكل (8). الهندسة العقدية للبرنامج Meshroom.

إن الهدف الرئيسي هو إنجاز النمذجة ثلاثية الأبعاد باستخدام عدد ما من الصور، والمراحل الرئيسية لتدفق العمل الافتراضي هو: اقتطاع البنية من الحركة SfM والتجسيم متعددة الصور (MVS) كما أنه من الممكن أيضاً إنشاء نماذج مع نسجة من مرحلة الـ SfM. تتكون هذه المراحل من مجموعة من العقد تتضمن: تهيئة آلة التصوير، اقتطاع السمات بتطبيق خوارزميات متنوعة (مثل [30] SIFT، [31] AKAZE) تهدف إلى تحديد الموقع النسبي لآلة التصوير، ربط الصور، ربط السمات، SfM، تخريط العمق Depth mapping، توليد النموذج الشبكي متبوعاً بترشيح النموذج والنسجة.

#### 4- دراسة أداء البرامج المختبرة

نقدم في هذا الجزء من البحث دراسة مقارنة للبرامج مفتوحة المصدر المختارة مسبقاً وذلك على قاعدة غمامة النقاط المولدة، زمن الحساب ودقة النمذجة. لقد أشرنا مسبقاً أن الهدف الأساسي لهذا البحث هو تقييم ومقارنة فعالية، دقة وقيود البرامج مفتوحة المصدر المختارة وذلك للمساعدة في اختيار البرنامج المناسب للنمذجة ثلاثية الأبعاد.

#### • طرائق المقارنة

لتحديد دقة الغمامات النقطية ثلاثية الأبعاد المشتقة من البرنامجين المختبرين، فقد تم استخدام مجموعة البيانات المتوافرة (الواجهة الغربية للمبنى) للمقارنة. وهنا تمت المقارنة بين الغمامات النقطية التي تنتجها البرامج مفتوحة المصدر وغمامة النقاط المرجعية الناتجة عن البرنامج التجاري (أي 3DF Zephyr Aerial) (الجدول (4)). في الواقع، تم استخدام هذه الفكرة التي اقترحها Schöning و Heidemann [14]. إن هذا يعني أن الأخطاء في توليد الغمامة باستخدام 3DF Zephyr Aerial لم تؤخذ في الاعتبار.

جدول (5). بيانات المعالجة باستخدام 3DF Zephyr Aerial (الغمامة المرجعية)

غمامة النقاط الكثيفة الناتجة	تفاصيل المعالجة
	- زمن توجيه الصور s 566.
	- عدد نقاط الغمامة المبعثرة 92,200.
	- زمن بناء الغمامة الكثيفة s 2,058.
	- عدد نقاط الغمامة الكثيفة 4,441,229.
	- زمن توليد النموذج الشبكي s 4,540.
	- عدد أوجه النموذج الشبكي 16,709,465.
	- الزمن الكلي للمعالجة s 7,164.

تمت معالجة الصور باستخدام البرنامجين مفتوح المصدر VisualSfM و Meshroom ويوضح الجدول (5) نتائج هذه المعالجة طبقاً لنموذج الجدول (4). بالنسبة للبرنامج VisualSfM فهو يوفر إمكانية قياس نقاط الضبط لحساب المقياس والمنسوب الحقيقيين للعنصر أما البرنامج Meshroom فلا يملك هذه الإمكانية.

جدول (6). بيانات المعالجة باستخدام 3DF Zephyr Aerial (الغمامة المرجعية)

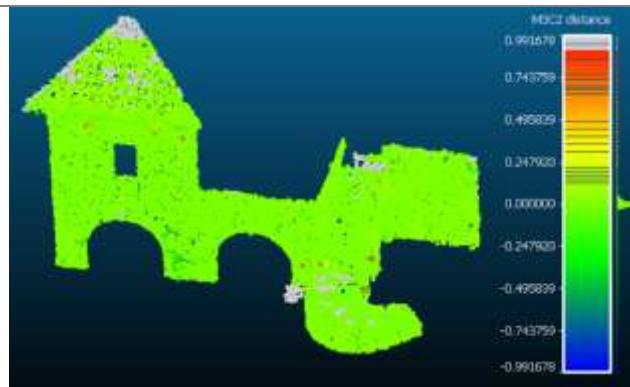
البرنامج	تفاصيل المعالجة	غمامة النقاط الكثيفة الناتجة
<b>VisualSfm</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- زمن توجيه الصور s 1,080.</li> <li>- عدد نقاط الغمامة المبعثرة 80,420.</li> <li>- زمن بناء الغمامة الكثيفة s 8,152.</li> <li>- عدد نقاط الغمامة الكثيفة 2,388,475.</li> <li>- الزمن الكلي للمعالجة s 5,200.</li> <li>- الخطأ الكلي على توجيه النموذج</li> </ul>	
<b>Meshroom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- زمن توجيه الصور s 820.</li> <li>- عدد نقاط الغمامة المبعثرة 85,201.</li> <li>- زمن بناء الغمامة الكثيفة s 7,225.</li> <li>- عدد نقاط الغمامة الكثيفة 1,117,446.</li> <li>- زمن توليد النموذج الشبكي s 5,202.</li> <li>- عدد أوجه النموذج الشبكي 4,204,224.</li> <li>- الزمن الكلي للمعالجة s 13,247.</li> <li>- لا تتوافر إمكانية لقياس نقاط الضبط.</li> </ul>	

نشير إلى أن غمامات النقاط الناتجة عن البرنامج 3DF Zephyr Aerial والبرنامج VisualSfm واقعة في نفس المرجع المكاني، أما غمامة النقاط الناتجة عن البرنامج Meshroom ليست كذلك والسبب هو عدم توافر إمكانية قياس نقاط الضبط في هذا البرنامج. لهذا السبب، كان لا بد من إجراء التسجيل اليدوي Registraton لهذه الغمامة مع الغمامة المرجعية (غمامة 3DF Zephyr Aerial) بالاستعانة بالبرنامج CloudCompare المجاني مفتوح المصدر. تمت عملية التسجيل باستخدام "خوارزمية أقرب نقطة تكرارية" Iterative Closest Point (ICP) [32] بدقة

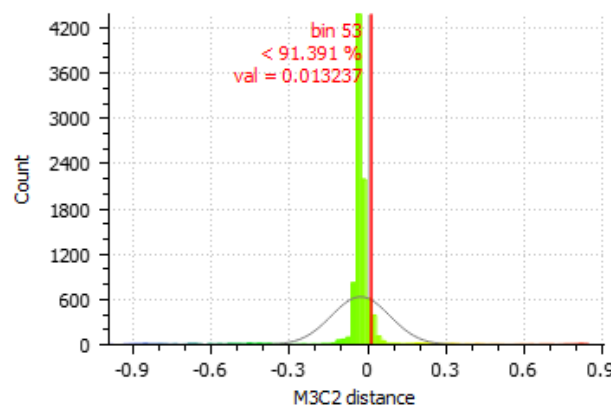
$$\sigma_{XYZ} = 10.56 \text{ mm}$$

بعد توقيع كل الغمامات في نفس المرجع المكاني، قمنا بحساب أقصر مسافة بين كل نقطة من غمامتي البرنامج مفتوحة المصدر وبين النقطة المقابلة لها في الغمامة المرجعية بتطبيق الخوارزمية C2M3. تعتبر هذه الخوارزمية أكثر الخوارزميات تطوراً من أجل مقارنة غمامة مع غمامة أخرى وهي تحسب المسافات بإشارات على طول النواظم على السطح وهي لا تتطلب استقرار السطوح وتعتبر مفيدة خاصة من أجل العناصر ثلاثية الأبعاد المعقدة. تم إظهار هذه المسافات على شكل خارطة ملونة مع حساب الوسطي والخطأ متوسط التوزيع للمسافات من أجل كامل الواجهة (الجدول (7) والجدول (8)).

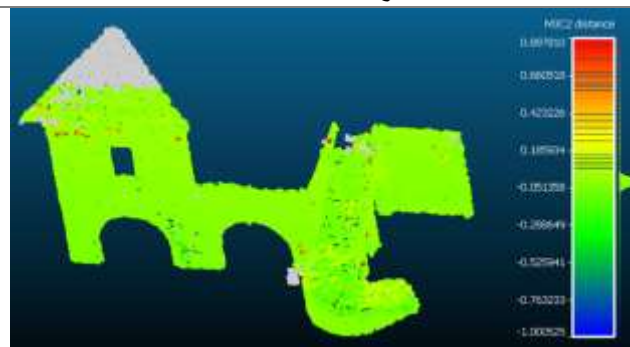
جدول (7). مقارنة غمامة النقاط الكثيفة VisualSfM مع الغمامة المرجعية 3DF Zephyr Aerial بتطبيق الخوارزمية M2C3



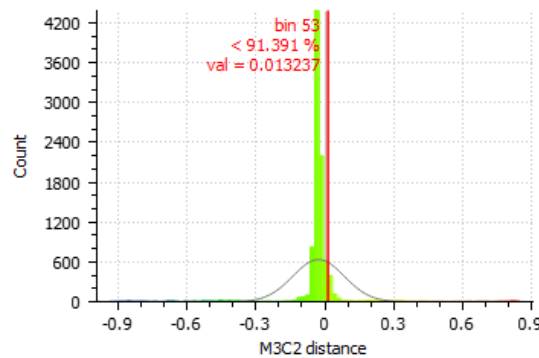
Gauss: mean = 0.002105 / std.dev. = 0.113407 [100 classes]



جدول (8). مقارنة غمامة النقاط الكثيفة Meshroom مع الغمامة المرجعية 3DF Zephyr Aerial بتطبيق الخوارزمية M2C3



Gauss: mean = 0.002105 / std.dev. = 0.113407 [100 classes]





## النتائج والمناقشة:

نلاحظ من الجدولين (4) و(5) ومن نتائج تسجيل الغمامات ما يأتي:

- 1- عدد نقاط الغمامة الكثيفة الناتجة عن تطبيق البرنامج VisualSfM يساوي تقريباً ضعف عدد نقاط الغمامة الكثيفة الناتجة عن تطبيق البرنامج Meshroom مع فارق بسيط في زمن المعالجة لتوليد هذه الغمامة.
  - 2- يجبنا توافر إمكانية قياس نقاط الضبط في البرنامج VisualSfM وجود مصدر جديد للأخطاء ناتج عن عملية تسجيل الغمامة الناتجة عن البرنامج Meshroom.
  - 3- إن عدم توافر إمكانية بناء النموذج الشبكي في البرنامج VisualSfM تضطرنا إلى القيام بمعالجة لاحقة في برنامج مستقل لبناء هذا النموذج وهذا ما لا يضطرنا إليه البرنامج Meshroom.
  - 4- إن استخدام الخوارزمية ICP في تسجيل الغمامات يؤمن دقة قريبة من دقة الإرجاع بقياس نقاط الضبط.
- نلاحظ من الجدولين (6) و(7) ما يأتي:

- 1- بالنسبة لغمامة النقاط الكثيف التي أنتجها البرنامج VisualSfM وجدنا أن المتوسط المطلق للمسافات الفاصلة بين نقاطها ونقاط الغمامة المرجعية قد بلغ 2.1 mm وأن 91.391% من الفروقات المحسوبة أقل من 1.3 cm وأن معظم الفروق موجودة في منطقة الدرج وفي أعلى الواجهة تحت السقف القرميدي مباشرةً وذلك بسبب صعوبة تصوير هذه الأماكن وعدم كفاية الصور التي تغطيها.
  - 2- بالنسبة لغمامة النقاط الكثيف التي أنتجها البرنامج Meshroom وجدنا أن المتوسط المطلق للمسافات الفاصلة بين نقاطها ونقاط الغمامة المرجعية قد بلغ 1.5 cm وأن 90.846% من الفروقات المحسوبة أقل من 0.55 cm وأن معظم الفروق موجودة في منطقة الدرج وفي أعلى الواجهة تحت السقف القرميدي مباشرةً وذلك بسبب صعوبة تصوير هذه الأماكن وعدم كفاية الصور التي تغطيها. يمكن تفسير الفرق الكبير في قيمة المتوسط المطلقة للمسافات بالخطأ الذي تم إدخاله بعملية تسجيل الغمامة وهي مرحلة لم تكن بحاجة إليها عند العامل مع غمامة VisualSfM.
- فيما يتعلق بتدفق العمل في البرنامجين VisualSfM و Meshroom لاحظنا ما يأتي:

- 1- بشكل عام، يعد البرنامج VisualSfM أداة ممتازة لتوجيه الصور ولتوليد غمامة نقاط كثيفة للعناصر المصورة ومن ثم تصديرها إلى بيئة نمذجة بالأبعاد الثلاثة، ولكنه يتطلب بالمقابل وجود أدوات إضافية مثل CMVS / PMVS يجب تنزيلها من مواقعها الخاصة ونسخها إلى المجلدات المحلية وهذا ربما يكون صعباً بالنسبة للمبتدئين أو غير المختصين. من ناحية أخرى، في حال فشل عملية توجيه الصور يجب البدء من جديد في عملية قياس نقاط الضبط حيث لا تتوفر إمكانية لحفظ هذه النقاط واستدعائها وقت الحاجة إليها. كما أنه لا تتوفر في البرنامج إمكانية بناء النموذج الشبكي والحقيقي وهذا يعد مشكلةً كبيرةً بسبب الحاجة إلى برنامج آخر مستقل للقيام بهذه العملية وهذا ليس سهلاً بالنسبة للمبتدئين وغير التقنيين.
- 2- يعتبر تدفق العمل العقدي في البرنامج Meshroom ميزةً رائعةً لأنها تمكن المستخدم من تحديد معاملات المعالجة التي يرغب بها والتوقف عند أية خطوة من خطوات المعالجة أو مراقبتها. المشكلة التي يعانيها هذا البرنامج هي عدم توافر إمكانية لوضع النموذج أو الغمامة ثلاثية الأبعاد على المقياس بسبب عدم القدرة على قياس مسافات مرجعية أو نقاط ضبط مما يضطرنا إلى القيام بعمليات تسجيل أو إرجاع لاحقة لهذه المنتجات وهذا يعتبر مصدر أخطاء جديدة.
- 3- يتم تخزين النتائج الوسيطة للبرنامجين في المجلد الذي يحدده المستخدم.



4- إن إضافة صور جديدة إلى البرنامجين لتحسين النتائج يجعل من زمن المعالجة طويلاً بسبب الحاجة إلى إعادة تحليل مجموعة البيانات.

### الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد إلى الدراسة العملية والنظرية التي أجريناها نجد أن:

1- البرنامج المفتوح المصدر VisualSfM هو الخيار الأفضل إذا كنا نبحث عن كمالية النموذج وعن الدقة الهندسية، فقد وجدنا أن عدد نقاط الغمامة الكثيفة الناتجة عن استخدامه بلغ تقريباً ضعف عدد نقاط الغمامة الناتجة عن استخدام البرنامج Meshroom (238,847 نقطة) كما وجدنا أن الدقة الهندسية الكلية لإرجاع الصور أو توجيهها في VisualSfM ( $\sigma_{XYZ} = 9.59 \text{ mm}$ ) وبالتالي فهي تصلح للعديد من أعمال النمذجة التي تتطلب دقة عالية. بالإضافة إلى توفيره لإمكانية قياس نقاط الضبط غير المتوفرة في البرنامج Meshroom.

2- من ناحية زمن المعالجة الكلي، يعتبر VisualSfM خياراً أفضل فقد بلغ هذا الزمن 5,200 s وهو يمثل 40% من زمن المعالجة المستهلك في حال استخدام Meshroom.

3- إذا كان المستخدم مبتدئاً يبحث عن نمذجة ثلاثية الأبعاد لأغراض العرض فقط فإننا ننصح Meshroom لأن تدفق العمل فيه أسهل من التدفق الخاص بالبرنامج VisualSfM، وهو يمكننا من توليد النموذج الشبكي وتطبيق النسجة. نوصي في آخر هذا البحث بمايلي:

1- اعتماد بيانات مرجعية مقاسة بالمسح الليزري لإجراء المقارنة بين البرمجيات وعدم الاكتفاء باستخدام نتائج برنامج تجاري.

2- زيادة عدد البرامج مفتوحة المصدر المختبرة والتي نذكر منها Regard3D، COLMAP و Python Photogrammetry Toolbox (PPT) للوصول إلى استنتاجات أكثر عمومية.

### References:

- [1] NGUYEN, M.H, WÜNSCHE, B., DELMAS, P., LUTTEROTH, C - *3D models from the black box: Investigating the current state of image-based modeling*. In Proceedings of the 20th International Conference on Computer Graphics, Visualisation and Computer Vision (WSCG 2012), Pilsen, Czech Republic, June 2012, pp 249-258.
- [2] RAHAMAN, H., CHAMPION, E., BEKELE, M.K - *From Photo to 3D to Mixed Reality: A Complete Workflow for Cultural Heritage Visualisation and Experience - Digit. Appl. Archaeolo. Cult. Herit. Vol.13, 2019.*
- [3] DURAND, H., ENGBERG, A., POPE, S.T - *A Comparison of 3d Modeling Programs* - University of California is Editor, ATON Project/CREATE, D.o.M: Santa Barbara, CA, USA, 2011, pp 1-9.
- [4] GRUSSENMEYER, P. AL KHALIL, O - *A comparison of photogrammetry software packages for the documentation of buildings* - In Proceedings of the Mediterranean Surveyor in the New Millennium, Malta, 18-21 September 2000.
- [5] WANG, Y.-F - *A Comparison Study of Five 3D Modeling Systems Based on the SfM Principles* - Technical Report 2011-01, Visualize Inc, Goleta, CA, USA, 2011, pp. 1-30.
- [6] BOLOGNESI, M. FURINI, A. RUSSO, V. PELLEGRINELLI, A. RUSSO, P - *Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry* - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2014, pp. 113-119.

- [7] DESEILLIGNY, M.P. LUCA, L.D. REMONDINO, F - *Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation* - Geoinf. FCE CTU, Vol.6, 2011, pp. 291–299.
- [8] ONIGA, E. CHIRILA, C. STATESCU, F - *Accuracy Assessment of a Complex Building 3d Model Reconstructed from Images Acquired with a Low-Cost Uas* - In Proceedings of the ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Nafplio, Greece, 1–3 March 2017, pp. 551–558.
- [9] KNAPITSCH, A. PARK, J. ZHOU, Q.-Y. KOLTUN, V - *Tanks and temples: Benchmarking large-scale scene reconstruction* - ACM Trans. Graph. (TOG), Vol. 36, 2017, pp. 1-13.
- [10] SANTAGATI, C. INZERILLO, L. DI PAOLA, F - *Image based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: Limits and potentialities* - In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg, France, 2–6 September 2013.
- [11] HAFEEZ, J. HAMACHER, A. SON, H.-J. PARDESHI, S. LEE, S.-H - *Workflow Evaluation for Optimized Image-Based 3D Model Reconstruction* - In Proceedings of the International Conference on Electronics, Electrical Engineering, Computer Science (EEECS): Innovation and Convergence, Qingdao, China, Vol. 10, 2016, pp. 62–65.
- [12] KOUTSOUDIS, A. ARNAOUTOGLU, F. PAVLIDIS, G. TSIAFAKIS, D. CHAMZAS, C - *A versatile workflow for 3D reconstructions and modelling of cultural heritage sites based on open source software* - In Proceedings of the Virtual Systems and Multimedia Dedicated to Digital Heritage Conference, Limassol, Cyprus, 20–26 October 2008, pp. 238–244.
- [13] FUHRMANN, S.; LANGGUTH, F.; GOESELE, M - *MVE-A Multi-View Reconstruction Environment* - In Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshops on Graphics and Cultural Heritage, Darmstadt, Germany, 6–8 October 2014, pp. 11–18.
- [14] SCHÖNING, J. HEIDEMANN, G - *Evaluation of multi-view 3D reconstruction software* - In Proceedings of the International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Valletta, Malta, 22–24 August 2015, pp. 450–461.
- [15] SKARLATOS, D. KIPARISSI, S - *Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces* - ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Vol. 3, 2012, pp. 299–304.
- [16] DEBEVEC, P.E. TAYLOR, C.J. MALIK, J - *Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach* - In Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer graphics and Interactive Techniques, Berkeley, CA, USA, 4–9 August 1996, pp. 11–20.
- [17] XIAO, J. FANG, T. TAN, P. ZHAO, P. OFEK, E. QUAN, L - *Image-based Façade Modeling* -. ACM Trans. Graph. (TOG), 2008.
- [18] BROWN, M. LOWE, D.G - *Unsupervised 3D object recognition and reconstruction in unordered datasets* - In Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, ON, Canada, 13–16 June 2005, pp. 56–63.
- [19] SNAVELY, N. SEITZ, S.M. SZELISKI, R - *Photo tourism: Exploring photo collections in 3D* - ACM Trans. Graph. (TOG) 2006, Vol.25, pp. 835–846.
- [20] AGARWALA, A. AGRAWALA, M. COHEN, M. SALESIN, D. SZELISKI, R - *Photographing long scenes with multi-viewpoint panoramas* - In Proceedings of the ACM SIGGRAPH, Boston, MA, USA, 30 July–3 August 2006, pp. 853–861.

- [21] REMONDINO, F. PIZZO, S.D. KERSTEN, T. TROISI, S - *Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation—A Critical Overview* - In Proceedings of the Progress in Cultural Heritage Preservation, Limassol, Cyprus, 29 October-3 November 2012, pp. 40-54.
- [22] DE REU, J. PLETS, G. VERHOEVEN, G. DE SMEDT, P. BATS, M. CHERRETTE, B. DE MAEYER, W. DECONYNCK, J. HERREMANS, D. LALOO, P. et al - *Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage* - Journal of Archaeological Science, Vol. 40, 2013, pp. 1108-1121.
- [23] NAUSNER, B - *Temple complex 'Virtual Nako'—3D Visualisation of cultural heritage in Google Earth* - In True-3D in Cartography, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011, pp. 349–356.
- [24] SAUERBIER, M - *Image-Based Techniques in Cultural Heritage Modeling* - In Scientific Computing and Cultural Heritage; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013, pp. 61–69.
- [25] DHONJUA, H. XIAOB, W. SARHOSIS, V. MILLS, J. WILKINSON, S. WANG, Z. THAPA, L. PANDAY, U - *Feasibility Study of Low-Cost Image-Based Heritage Documentation in Nepal* - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Vol. 42, 2017, pp. 237–242.
- [26] BERTOCCHI, S. ARRIGHETTI, A. BIGONGIARI, M - *Digital Survey for the Archaeological Analysis and the Enhancement of Gropina Archaeological Site* – Heritage, Vol.2, 2019, pp. 848–857.
- [27] SCIANNA, A. LA GUARDIA, M - *Survey and Photogrammetric Restitution of Monumental Complexes: Issues and Solutions—The Case of the Manfredonic Castle of Mussomeli* - Heritage Vol.2, 2019, pp. 774–786.
- [28] BOOCHS, F. HEINZ, G. HUXHAGEN, U. MÜLLER, H - *Low-cost image based system for nontechnical experts in cultural heritage documentation and analysis* - In Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 1–6 October 2007.
- [29] KERSTEN, T.P. LINDSTAEDT, M - *Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects* - In Proceedings of the Euro-Mediterranean Conference, Barcelona, Spain, 2–3 April 2012, pp. 1–10.
- [30] DAVID G. LOWE - *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints* - Int. J. Comput. Vis, 2004, pp.91–110.
- [31] P. F. ALCANTARILLA, J. NUEVO, AND A. BARTOLI - *Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces* - In British Machine Vision Conf. (BMVC), 2013.
- [32] BESL, P.J. MCKAY, N.D - *A method for registration of 3-D shapes* - IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. Vol. 14, 1992, pp. 239–256.