Evaluation the Impact of Photo Overlap Ratio on Point Cloud Density and Visual Accuracy of 3D Models in Structure-from-Motion Photogrammetry

Dr. Omar AL KHALIL *
Al-Hussien Mayhoub**

(Received 3 / 9 / 2024. Accepted 28 / 10 / 2024)

□ ABSTRACT □

The accuracy of Structure from Motion (SfM) algorithm products is influenced by several factors, including the Photo overlap ratio, the image scale, Number of control points, distribution of these points, resolution of captured images, and other factors. This study examines the impact of Photo overlap ratio in consecutive images on point cloud density and visual accuracy in 3D models using the Structure from Motion (SfM) algorithm, while minimizing the influence of other factors. The results showed that an overlap ratio of 86% provides an optimal balance between accuracy and time efficiency, achieving a point cloud density of 1,239,627 points with a processing time of 4 minutes and 4 seconds. This accuracy was achieved with a lower time cost compared to the 93% overlap ratio, which increased processing time by 30% without a significant improvement in density or accuracy. It was also observed that overlap ratios lower than 86% lead to a decline in image triangulation quality and an increase in distortions. Therefore, an overlap ratio of 86% is considered optimal for photogrammetric applications that require both accuracy and speed. The study recommends future research to examine the impact of control point distribution to further improve results.

Keywords: Visual Accuracy, 3D points cloud, Photo Overlap, SfM Photogrammetry.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy**
****Postgraduate Student (Master), Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. alhussien.mayhoub@tishreen.edu.sy**

تقييم تأثير نسبة تداخل الصور المتعاقبة على كثافة غمامة النقاط والدقّة البصرية للنماذج ثلاثية الأبعاد في المساحة التصويرية القائمة على اقتطاع البنية من الحركة

د. عمر محمد الخليل *

الحسين محمد ميهوب **

(تاريخ الإيداع 3 / 9 / 2024. قُبِل للنشر في 28/ 10 / 2024)

□ ملخّص □

تتأثر دقة منتجات خوارزميات اقتطاع البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) بعدة عوامل منها نسبة التداخل بين الصور ومقياس الصور وعدد نقاط الضبط وتوزيع هذه النقاط ودقة تمييز الصور المستخدمة وعوامل أخرى. تتناول هذه الدراسة تأثير نسب تداخل الصور المتعاقبة على كثافة الغمامات النقطية والدقة البصرية في النماذج ثلاثية الأبعاد باستخدام خوارزمية اقتطاع البنية من الحركة(SfM) ، مع الحدّ من تأثير العوامل الأخرى. أظهرت النتائج أن نسبة التداخل 86% توفر توازنًا مثاليًا بين الدقة والكفاءة الزمنية، حيث حققت كثافة غمامة 1,239,627 نقطة بزمن معالجة 4 دقائق و4 ثوانٍ، وهي نتائج دقيقة بكلفة زمنية أقل مقارنة بنسبة 93%، التي زادت زمن المعالجة بنسبة 30% دون تحسين ملحوظ في الكثافة أو الدقة. كما لوحظ أن نسب التداخل الأقل من 86% تؤدي إلى تدهور في جودة التثليث الصوري وزيادة التشوهات. لذا، تُعتبر نسبة 86% الأمثل لتطبيقات المسح التصويري التي تتطلب دقة وسرعة. توصي الدراسة بأبحاث مستقبلية لدراسة تأثير توزع نقاط الضبط لتحسين النتائج.

الكلمات المفتاحية: اقتطاع البنية من الحركة، تداخل الصور، الدقة البصرية، غمامة نقاط ثلاثية الأبعاد.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* أستاذ. قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.
omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

** طالب دراسات عليا (ماجستير) . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.
alhussien.mayhoub@tishreen.edu.sy

مقدّمة:

مع تطور الأبحاث في مجال الرؤية بمعونة الحاسب، ظهرت طريقة الحصول على البنية انطلاقاً من الحركة Structure from Motion (SfM) من أجل التوليد الآلي للنماذج ثلاثية الأبعاد للعناصر انطلاقاً من الصور المتعددة التي تغطي هذه العناصر [1]. وفي هذه الطريقة، يتم أولاً اقتطاع غمامة كثيفة من النقاط ثلاثية الأبعاد التي تمثل العنصر المصور ومن ثم تستخدم هذه الغمامة في بناء نموذج العنصر. هذا، ويمكن مقارنة غمامات النقاط المقتطعة والنماذج الرقمية للسطوح Digital Surface Models (DSMs) الناتجة عن هذه الطريقة، بتلك التي تنتجها الماسحات الليزرية الجوية والأرضية وذلك بالنظر إلى نوعية البيانات والكثافة المحققة [2]. ولكن تطبيق هذه الطريقة، يستوجب، من جهة أخرى، تحقيق بعض شروط المساحة التصويرية التجسيمية التقليدية (التداخل بين الصور) [3]. والفرق الرئيسي هنا هو قدرة خوارزميات SfM على توجيه الصور بشكل شبه آلي ولا توجد ضرورة لمعرفة معاملات معايرة آلة التصوير Camera calibration ومواقع هذه الآلة وتوجيهها أو حتى استخدام نقاط ضبط [4]. ولكن في حال استخدام المسح التصويري القائم على خوارزمية SfM من أجل الحصول على معلومات مترية دقيقة، فلابد من المعاملات السابقة بعين الاعتبار.

تقوم خوارزميات الـ SfM بالبحث عن النقاط المشتركة بين الصور ويتم بعد ذلك تعديل الحزم Bundle adjustment ضمن بلوكات الصور من أجل تحديد مواقع وتوجيهات آلة التصوير بتطبيق التثليث الصوري Photo-triangulation. يمكن بعد ذلك القيام بالتوجيه المطلق Absolute orientation لربط بلوك الصور بنظام إحداثيات العنصر باستخدام نقاط الضبط. يتم تطبيق خوارزميات ربط الصور Image matching وذلك لتوليد غمامة النقاط الكثيفة Dens cloud [5] والتي تعتبر مدخلاً أساسياً للعديد من المنتجات مثل النماذج ثلاثية الأبعاد. هذا، وتتوفر عدة أساليب لتنفيذ خوارزميات SfM في العديد من البرمجيات المختصة بالمساحة التصويرية [6].

فيما يخص الدقة الهندسية لمنتجات الـ SfM فإنها تتأثر بعدة عوامل منها نسبة التداخل بين الصور Photo overlap [7] وبمقياس الصور (مرتبط بمسافة التراجع وهي المسافة بين العنصر وآلة التصوير) وبعدد نقاط الضبط وبتوزيع هذه النقاط [8] وبدقة تمييز الصور Image resolution المستخدمة وكذلك بمعاملات معايرة آلة التصوير المستخدمة [9].

يُعد التداخل بين الصور المتعاقبة عنصراً أساسياً لضمان جودة ودقة النتائج المستخرجة، حيث يشير التداخل إلى المنطقة المشتركة بين صورتين متتاليتين. الهدف من تحقيق هذا التداخل هو توفير بيانات كافية لتثليث النقاط المشتركة بين الصور، مما يسمح بإنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد دقيقة من العناصر المصوّرة. يعتمد المسح التصويري، وخاصة باستخدام تقنيات مثل اقتطاع البنية من الحركة (SfM)، على التداخل لضمان وجود معلومات مشتركة بين الصور التي تساعد في تقدير المواقع الجغرافية والتوجيهات النسبية للكاميرات المستخدمة، وبالتالي تحسين التثليث الصوري وجودة الغمامات النقطية.

تم في هذا البحث تقديم منهجية تركز فقط على تأثير تغير نسبة التداخل بين الصور على القدرة التعبيرية عن العنصر وعلى كثافة غمامات النقاط المولّدة باستخدام طريقة SfM ودقتها والزمن اللازم لتوليدها وكذلك على التقييم البصري للنموذج وذلك بشكل تجريبي. تم ذلك مع الحدّ من تأثير كل العوامل الأخرى على الدقة. والعوامل التي ثبتناها هي عدد وتوزع نقاط الضبط، مسافة التراجع، دقة تمييز الصور المستخدمة وكذلك استخدام نفس آلة التصوير غير المعايرة في التقاط الصور.

استخدمنا في هذه التجربة آلية الحلقة (The Ring) لمحاكاة التصوير بطريقة SfM، وهي طريقة حديثة نسبياً بدأ العمل بها بحلول أوائل العام 2000، انتشر استخدامها في برامج المسح التصويري وفي التطبيقات التجارية لإنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد للعناصر بدقة. تقوم على مبدأ تحريك آلة التصوير حول العنصر، وذلك باعتماد طريقة تقوم على تثبيت آلة التصوير وتدوير العنصر المصور باستخدام قرص دوّار مزود بأداة لتحديد قيم زوايا الدوران. سمحت هذه المنهجية لنا بتثبيت العوامل المؤثرة على المدخلات والنتائج في كل مراحل التجربة وبأخذ تأثير نسبة التداخل فقط على النتائج.

أهمية البحث وأهدافه:

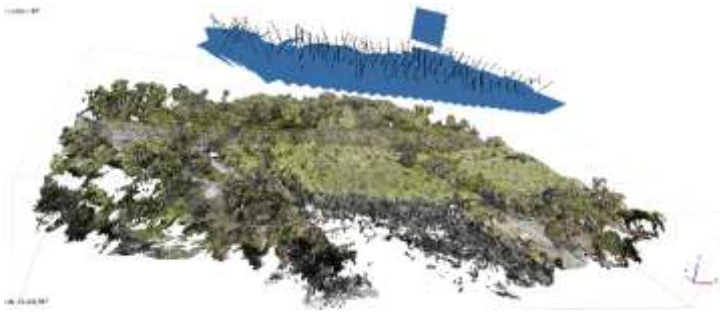
تكمن أهمية البحث في محاولته دراسة تأثير نسب التداخل بين الصور المتعاقبة فقط على الدقة البصرية للعنصر وعلى كثافة الغمامات المقتطعة من الصور وعلى المدة الزمنية اللازم لتوليدها وكذلك على التقييم البصري للنموذج. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية:

- التحقيق بشكل تجريبي في تأثير نسبة تداخل الصور فقط على منتجات خوارزميات الـ SfM.
- تقييم دقة وكمالية منتجات خوارزميات الـ SfM بعدة طرائق وذلك باستخدام معايير بصرية (جودة النسجة، الفجوات والثقوب، تفاصيل السطح، دقة الألوان، سلامة البنية) وكذلك كثافة غمامات النقاط المولدة والمدة اللازمة لتوليدها.

طرائق البحث ومواده:

1. تقنية اقتطاع البنية من الحركة (SfM)

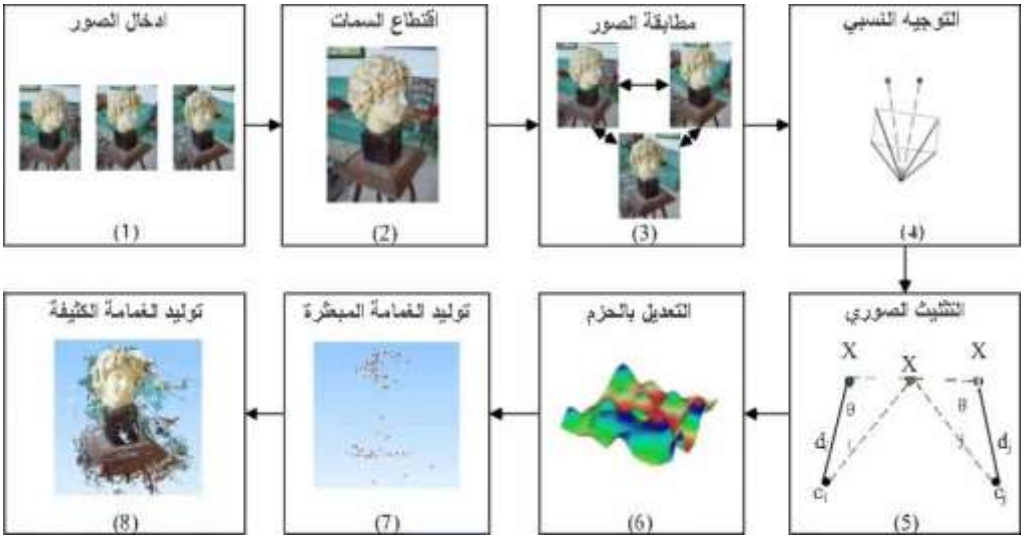
تُستخدم هذه التقنية في المساحة التصويرية التحليلية لإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد من خلال تحليل سلسلة من الصور الملتقطة من زوايا متعددة. تعتمد هذه التقنية على مطابقة النقاط أو العناصر المشتركة بين الصور لإعادة بناء البنية ثلاثية الأبعاد للمشهد، يوضح الشكل (1) احدى تطبيقات هذه التقنية.



الشكل 1() تطبيقات تقنية SfM ؛المصدر: من [10]

تبدأ العملية بمطابقة الصور باستخدام خوارزميات متخصصة، مثل خوارزميةSIFT ، التي تحدد السمات أو النقاط المشتركة بين الصور المختلفة. بعد ذلك، يتم توجيه الصور نسبياً عبر حساب انتقال ودوران الصور بالنسبة لبعضها البعض ضمن نموذج ثلاثي الأبعاد.

الخطوة التالية هي التثليث الصوري، حيث يتم قياس نقاط محددة على الصور لتقدير إحداثياتها ثلاثية الأبعاد. ثم يتم تحسين هذا التقدير باستخدام تقنيات التثليث الصوري المؤتمت والتعديل بطريقة الحزم، التي تعتمد على معالجة البيانات بشكل متكرر للحصول على نتائج دقيقة، الشكل (2) يبين تسلسل خطوات النمذجة بهذه التقنية.

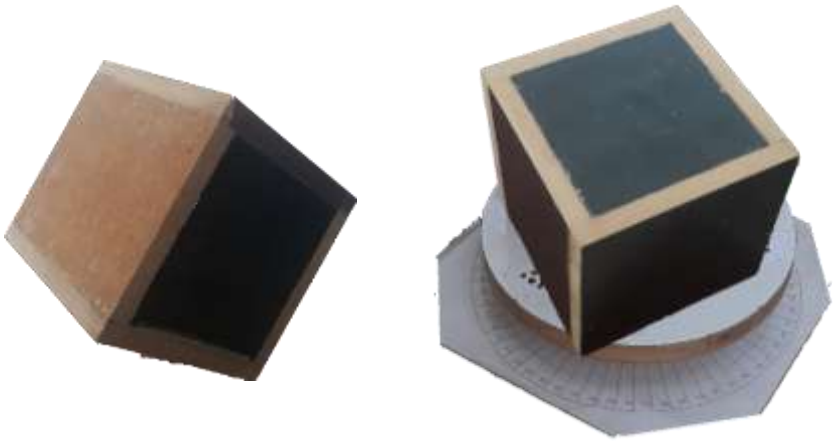


الشكل 2() خطوات النمذجة بتقنية SfM؛ المصدر: من [11]

في النهاية، يتم توليد غمامة كثيفة من النقاط التي تمثل بنية المشهد ثلاثي الأبعاد. هذه الغمامة تُستخدم لإنشاء نماذج رقمية للارتفاع والسطح، والتي يمكن تحسينها لاحقاً للحصول على نماذج دقيقة للأرض أو السطح. الصور المصححة عمودياً (الأورثوفوتو) تُستخدم لتقديم تمثيل دقيق لموقع كل نقطة، مما يجعل هذه التقنية مهمة في المساحة التصويرية.

2. عنصر التجربة

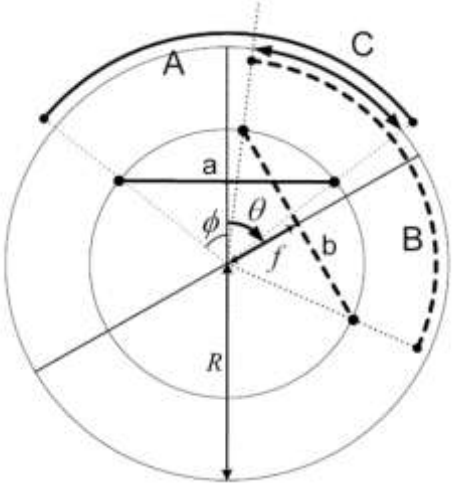
تتألف عناصر التجربة من عنصر الاختبار (الشكل (3)) وهو عبارة عن مكعب طول حرفه 15 cm مصنوع من الخشب الصناعي بخطأ نسبي في الأبعاد 0.667% (15cm ±1mm) صُنع من قبل نجّار مختص راعى فيه أقصى معايير الدقة الممكنة في التصنيع من أبعاد وتعامد زوايا، ومما سميناه بالقرص الدوار وهو عبارة عن قرص خشبي دائري الشكل قطره 15cm، يوضع فوقه عنصر التجربة. قمنا بتصميم هذا القرص بحيث يدور حول محور مثبت على لوح ملصق عليه ورقة تفيد كمنقلة تقسم الدائرة الأفقية إلى 120 قسماً متساوياً (كل قسم 3 درجات)، كما تم تزويد القرص بألية تثبيت للدوران ومؤشر للزوايا بهدف تأمين آلية للتدوير بالزاوية المطلوبة (الشكل (3)). لقد جاءت فكرة تصميم القرص الدوار بهدف محاكاة مبدأ التصوير في المساحة التصويرية القائمة على الحصول على البنية من الحركة SfM photogrammetry ولتأمين نسب تداخل محددة مسبقاً بين الصور. في بحثنا هذا كان المطلوب تثبيت كل العوامل التي تؤثر على القدرة التعبيرية عن العنصر وعلى دقة وكثافة غمامات النقاط مع الحفاظ على تأثير نسب تداخل الصور. لقد تم تثبيت مسافة التراجع والحفاظ على نفس شروط التقاط الصور وهذا ما يؤمنه القرص الدوار عبر تدوير العنصر بزوايا محددة تناسب نسب التداخل بين الصور مع تثبيت آلة التصوير على مسافة محددة.



الشكل (3) عنصر الاختبار والقرص الدّوار.

يمكن تجسيد نسب التداخل بين الصور بالاستعانة بزوايا الدوران التي يتم التحكم بها بواسطة القرص الدوار. تقوم الفكرة على تقليد أسلوب التصوير الأساسي المستخدم في التصوير البانورامي ولكن باستخدام آلة تصوير إطارية Frame camera. يؤمن هذا التصوير تغطية دائرية أفقية بمقدار 360° حيث يتم من نقطة تمركز آلة التصوير الواحدة التقاط صورة عند كل زاوية θ وذلك لتأمين قيمة محددة مسبقاً من التداخل الطولي بين كل صورتين متتاليتين. يتم اختيار الزاوية θ بحيث تؤمن قيمة التداخل المطلوبة.

في طريقتنا، تتلخص المسألة بحساب قيمة نسب التداخل المرافقة لقيم محددة مسبقاً للزاوية θ ولحسابها قمنا هنا بالرجوع إلى المبدأ المطبق في التصوير الأفقي البانورامي للحصول على منطقة تداخل بين الصور الملتقطة. يبين الشكل (4) صورتين A وB وهما الصورتان الأولى والثانية على التوالي في سلسلة الصور الملتقطة من محطة ما. زاوية دوران آلة التصوير هي θ والبعد المحرقي f. نظراً لأن آلة التصوير تدور فقط في الاتجاه الأفقي، فإن السطح الأسطواني هو الأنسب لإسقاط وتكوين الصور المتتالية. وهنا، يتم عرض الصور على سطح أسطواني نصف قطره R، ويتم إنشاء الصور المسقطة A و B. أما القوس C في الشكل (4) فيمثل الجزء المتداخل من الصورتين المسقطتين.



الشكل (4) . منظر علوي لهندسية حركة آلة التصوير؛ المصدر: من [12]

لتكن ϕ هي نصف زاوية مجال الرؤية View Angle التي يمكن تحديدها بواسطة معاملات آلة التصوير W وf (المعادلة (1)).

$$\emptyset = arctan\left(\frac{W/2}{f}\right) \quad \textbf{(1)}$$

حيث W هو عرض الصورة بالمليمتر.

لتكن τ هي نسبة التداخل بين الصور المسقطة، وبما أن زاوية C تصبح مساويةً لـ $(2\emptyset - \theta)$ وطول قوس C هو $(2\emptyset - \theta)$، فإنه من الممكن حساب τ من المعادلة (2) كما يأتي:

$$\tau = \frac{2R\emptyset - R\theta}{2R\emptyset} = 1 - \frac{\theta}{2\emptyset} \quad \textbf{(2)}$$

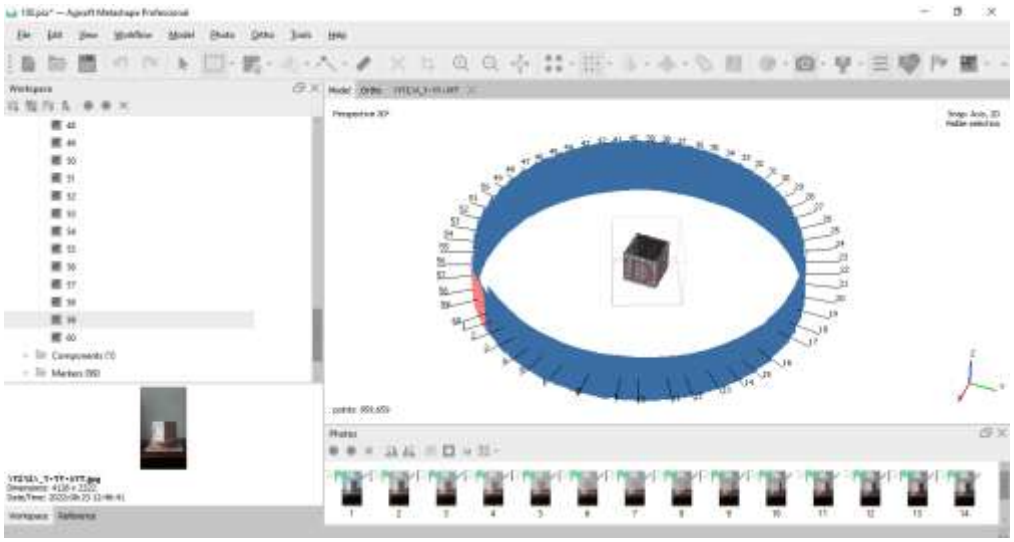
3. آلة التصوير الرقمية المستخدمة

تم استخدام آلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقّال Samsung J7 (الشكل (2)) ذات دقة التمييز 10 Megapixel ومقاس صورة مساو لـ5.18 mm x 2.91 mm وبعد محرقي 3.71mm. تبلغ أبعاد البكسل في الصورة 1.26 ميكرون.

الشكل (5). آلة التصوير الرقمية المستخدمة في البحث؛ المصدر من :[13]

4. 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 هو خدمة على الأنترنيت Web service مثل Autodesk Photofly و123D Catch ، إلا أنها تعاني من محدودية البيانات التي يمكن أن تعالجها وكذلك محدودية النتائج، ومنها ما تجاري مثل البرنامج Agisoft Metashape والبرنامج PhotoModler Scanner. مقارنةً بباقي البرامج، قد يكون البرنامج الروسي Agisoft Metashape (وهو البرنامج المستخدم في هذا البحث) هو من أفضل النظم التي تمثل تقنية الـ SfM فهو يملك واجهة تخاطبية (الشكل (6)) سهلة الاستخدام كما يمكّن المستخدم من الحكم على نوعية منتجه وربطه مع أي نظام إحداثيات إضافةً إلى إمكانية معالجة الصور الصورية والأرضية على حد سواء وكذلك تصدير النموذج الثلاثي الأبعاد بصيغ عديدة [14].



الشكل (6). الواجهة الرئيسية للبرنامج Agisoft Metashape.

النتائج والمناقشة:

للوصول إلى النتائج المرجوة من هذا البحث، تم تقسيم العمل إلى المراحل الآتية:

1) تصميم التجربة.
2) التقاط الصور للعنصر المدروس مع تغيير نسب التداخل بين الصور.
3) إنجاز التثليث الصوري وتوليد الغمامات ثلاثية الأبعاد للعنصر المدروس، وتقييم النتائج من ناحية الدقة الهندسية والكمالية.

أولاً: التقاط الصور

تم وضع آلة التصوير على ثلاثية أرجل وتثبيته بحاضنة محمولة على عصى بحيث تمنع حركة آلة التصوير لحظة التقاط الصور، تبعد آلة التصوير عن العنصر مسافة D=80 cm تقريباً وبالتالي سيكون مقياس الصور:

$$\frac{1}{S}=\frac{f}{D}=\frac{1}{216} \qquad (3)$$

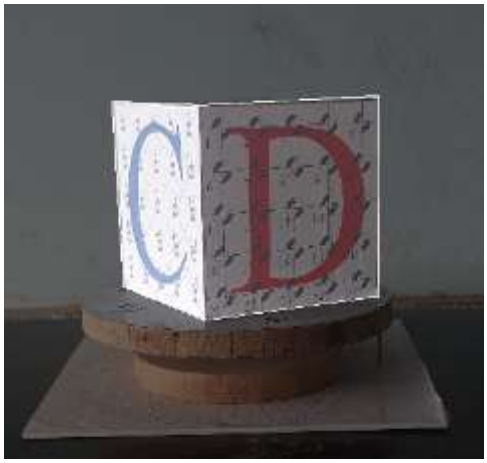
حيث f هو البعد المحرقي لآلة التصوير.

عند التقاط الصور تم تثبيت عنصر التجربة على القرص الدوار وتدوير القرص بزاوية محددة في كل جولة تصوير وحساب نسبة التداخل الموافقة لها بتطبيق العلاقة (2). يمكن تأمين التدوير بهذه الزاوية باستخدام آلية تشبه المنقلة مثبّتة في أسفل القرص الدوار. يوضح الجدول (1) قيم زوايا التدوير والنسب المئوية لتداخل الصور وعدد الصور في كل جولة تصوير.

جدول (1). زوايا الدوران، نسب تداخل الصور وعدد الصور الموافق لكل حالة تجربة.

	الحالة الأولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة	الحالة الرابعة	الحالة الخامسة	الحالة السادسة
زاوية الدوران (درجة)	3	6	9	12	15	18
نسبة التداخل (%)	93%	86%	79%	72%	65%	58%
عدد الصور	120	60	40	30	20	17

تجب الإشارة إلى ضرورة استخدام الأقنعة Masks لكل صورة بحيث يتم إهمال كل بكسل خارج العنصر (الشكل (7))، وذلك بهدف محاكاة الحالة التي تتحرك فيها آلة التصوير حول العنصر.



الشكل (7) . إضافة قناع للصورة.

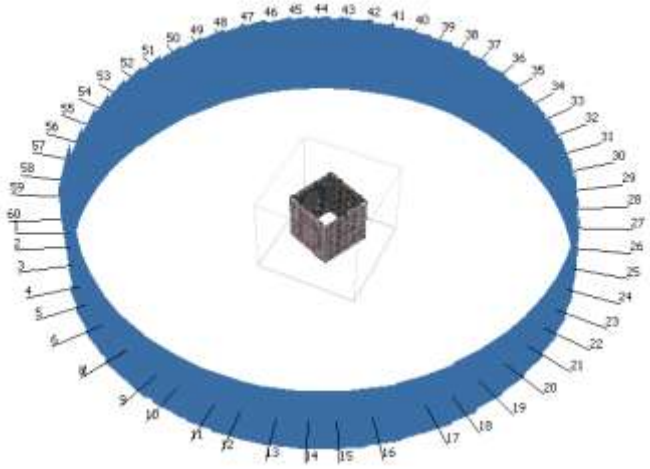
ثانياً: المعالجة

قمنا باستخدام البرنامج Agisoft Metashape في حساب التثليث الصوري للصور. يقوم هذا البرنامج باستشعار سمات مشتركة بين الصور ويربطها بتقنية ربط الصور Image matching. ينتج عن المرحلة السابقة ما نسميه بالغمامة المبعثرة من النقاط Sparse cloud التي يستخدمها لاحقاً في تحديد مواقع آلة التصوير وتوجيهها. عند قياس نقاط الضبط يتم ربط هذه المواقع والتوجيهات بنظام إحداثيات العنصر.

تمت عملية توجيه صور العنصر لكل نسبة تداخل (زاوية دوران) المقترحة في البحث باستخدام حاسوب له المواصفات التالية: RMA 8 GB, i8 مع اعتماد مستوى المعالجة العالي (استخدام دقة التمييز الكاملة للصور) في حساب صور كل جولة من جولات التصوير.

نعطي فيما يأتي مثالاً عن عملية التوجيه انطلاقا من صور ملتقطة عند زاوية دوران 3 درجات (الموافقة لنسبة تداخل 93%)، حيث تم استخدام 120 صورة التقطتها آلة التصوير. تم أولاً توجيه الصور بشكل نسبي ضمن حيّز الصورة

وذلك باستخدام 16,364 نقطة ربط استشعرها البرنامج آلياً عند مستوى المعالجة المستخدم ثم تم تحديد مواقع وتوجيه آلة التصوير (الشكل (8)) ضمن جملة الإحداثيات المحلية المعتمدة.



الشكل (8) . مواقع وتوجيه آلة التصوير ضمن جملة إحداثيات العنصر.

تم حساب غمامة النقاط الكثيفة عند مستوى المعالجة العالي فكان عدد نقاطها 1,239,627 نقطة (الشكل (9)).

الشكل (9) . غمامة النقاط الكثيفة للعنصر بنسبة تداخل 93%.

تمت متابعة عملية المعالجة بالنسبة لنسب تداخل الصور الأخرى، أخذين بعين الاعتبار الحد من تأثير العوامل كافةً عدا متغيرات البحث. يبين الجدول (2) نتائج المعالجة لكل نسبة تداخل.

جدول (2). نتائج ربط الصور وتوجيهها النسبي وتوليد الغمامة الكثيفة.

	الحالة لأولى	الحالة الثانية	الحالة الثالثة	الحالة الرابعة	الحالة الخامسة	الحالة السادسة
زاوية الدوران (درجة)	3	6	9	12	15	18
نسبة التداخل (%)	93%	86%	79%	72%	65%	58%
عدد الصور	120	60	40	30	20	17
عدد نقاط الغمامة المبعثرة	16,364	9366	6864	4630	3687	فشل في التوجيه
عدد نقاط الغمامة الكثيفة	1,239,627	998,410	1,187,693	1,150,343	1,056,128	فشل في التوجيه
زمن توليد الغمامة الكثيفة	18 m 5s	12 m 38s	8 m 24 s	5 m 13s	4 m 4s	فشل في

التوجيه						
فشل في التوجيه	16	26	40	60	112	**عدد الصور الموجهة بشكل صحيح**
فشل في التوجيه	80%	86.7%	100%	100%	93.3%	**النسبة المئوية للصور الموجهة**

عند تقييم النماذج ثلاثية الأبعاد المستخرجة باستخدام نسب تداخل مختلفة بين الصور، تم تحليل عدة مؤشرات هامة لتحديد نسبة التداخل الأمثل. تشمل هذه المؤشرات عدد الصور، عدد نقاط الغمامة (سواءً المبعثرة أو الكثيفة)، زمن توليد الغمامة الكثيفة، وعدد الصور الموجهة بشكل صحيح. بناءً على هذا التحليل، تم تحديد نسبة التداخل التي تقدم أفضل توازن بين دقة النموذج وكفاءة المعالجة.

1. **عدد الصور**: يزداد عدد الصور المطلوبة مع زيادة نسبة التداخل، حيث تطلبت الحالة الأولى بنسبة تداخل 93% أكبر عدد من الصور (120 صورة)، بينما كانت الحالة السادسة بنسبة تداخل 58% الأقل (17 صورة). زيادة عدد الصور تعني مزيداً من البيانات لتحليلها، مما قد يحسن دقة النموذج لكنه يزيد من تعقيد المعالجة.
2. **عدد نقاط الغمامة المبعثرة:** هذا المؤشر يعكس التفاصيل الأولية التي يتم التقاطها من الصور. لاحظنا زيادة ملحوظة في عدد النقاط مع ارتفاع نسبة التداخل، حيث سجلت الحالة الأولى (93%) أعلى عدد من النقاط المبعثرة (16,364 نقطة)، بينما كانت الحالة السادسة (58%) الأقل (3,687 نقطة). زيادة عدد النقاط تشير إلى تمثيل أفضل للتفاصيل الدقيقة في النموذج.
3. **عدد نقاط الغمامة الكثيفة:** يعتبر عدد نقاط الغمامة الكثيفة مؤشراً على دقة النموذج النهائي. على الرغم من أن عدد النقاط يزداد مع زيادة نسبة التداخل، إلا أن هناك انخفاض طفيف في الحالة الثانية بنسبة 86% (998,410 نقطة) مقارنة بالحالة الأولى بنسبة 93% (1,239,627 نقطة). هذا الانخفاض البسيط يعوضه التوازن العام بين الدقة والتكلفة الزمنية.
4. **زمن توليد الغمامة الكثيفة:** زمن التوليد يرتبط بشكل مباشر بالتعقيد وحجم البيانات المعالجة. وجدنا أن الزمن يزداد بشكل كبير مع زيادة نسبة التداخل، حيث تطلبت الحالة الأولى (93%) زمناً أطول (18 دقيقة و5 ثواني)، بينما كانت الحالة السادسة (58%) الأقل زمناً (4 دقائق و4 ثواني). الزمن الأطول يعكس عمليات معالجة أكثر تعقيداً قد تؤدي إلى نتائج أدق.
5. **النسبة المئوية للصور الموجهة بشكل صحيح:** هذا المؤشر يزداد بوضوح مع ارتفاع نسبة التداخل، حيث بلغت النسبة في الحالة الأولى (93%) 93.3%، مقابل 80% في الحالة السادسة (58%). تعد هذه النسبة مؤشراً قوياً على جودة التوجيه وصحة التركيب في النموذج النهائي.

من خلال تحليل متعدد المعايير، نجد أن نسبة التداخل 86% تقدم توازناً مثالياً بين الدقة (998,410 نقطة غمامة كثيفة)، زمن المعالجة (12 دقيقة و38 ثانية)، ونسبة التوجيه الصحيح للصور (100%). بينما تحقق نسبة 93% دقة أعلى بقليل، إلا أن التكلفة الزمنية العالية تجعلها أقل كفاءة. لذا، يُعتبر التداخل بنسبة 86% الأمثل لتقديم تمثيل دقيق للنموذج مع كفاءة عالية في المعالجة، مما يجعله الأنسب للتطبيقات العملية التي تتطلب دقة وكفاءة معالجة عالية.

من أجل تقييم جودة النماذج ثلاثية الأبعاد المقتطعة قمنا باستخدام معايير بصرية أساسية يتحدد على اساسها نسبة التداخل الأمثل، وتشمل هذه المعايير:

1. **جودة النسجة(Texture Quality)**: تقييم وضوح ودقة النسجة الظاهر على النموذج. حيث يتم فحص نسيج النموذج بحثاً عن أي ضبابية أو تشوهات أو عدم اتساق، يجب أن تكون النسجة عالية الجودة وواضحة ومتناسقة جيداً مع الهندسة الأساسية للعنصر.
2. **التحقق من الفجوات والثقوب (Gaps and Holes)**: فحص النموذج للكشف عن أي فجوات أو ثقوب. حيث يتم البحث عن أي تشوهات غير مقصودة في النموذج مثل الانحناءات أو التمدد أو التشوهات. وتنتج عن التوجيه السيء للصور أو معايرة الكاميرا غير الصحيحة
3. **تفاصيل السطح (Surface Detail)**: تقييم دقة ووضوح تفاصيل السطح (التفاصيل الدقيقة على سطح النموذج). يجب على النموذج الجيد التقاط الميزات الدقيقة بدقة مثل الحواف والانحناءات الصغيرة والتفاصيل الطفيفة
4. **دقة الألوان (Color Fidelity)**: قياس مدى تطابق الألوان مع النموذج الأصلي، يجب أن تكون الألوان دقيقة ومتناسقة دون وجود عيوب أو تغييرات ملحوظة في اللون.
5. **سلامة البنية (Structural Integrity)**: تقييم تكامل الهيكل الهندسي للنموذج.

لإجراء تقييم دقيق لنسب التداخل المختلفة لمزدوجات الصور وتحليل أدائها عبر تحليل متعدد المعايير ، نركز على المقارنة بين النسب المختلفة عبر جميع جوانب التقييم البصري:

1. **نسبة تداخل 58%**

- جودة النسجة: النسيج ضبابي وغير واضح، مما يعوق دقة التمثيل. الحروف والألوان تعاني من تشوهات كبيرة.
- الفجوات والثقوب: يحتوي النموذج على عدد كبير من الفجوات، مما يشير إلى نقص كبير في البيانات.
- تفاصيل السطح: تفاصيل السطح غير واضحة، وهناك تشوهات كبيرة تعيق التمثيل الهندسي الدقيق.
- دقة الألوان: الألوان غير دقيقة وغير متناسقة، مع وجود تفاوت كبير بينها وبين الأصل.
- سلامة البنية: الهيكل غير مكتمل ويحتوي على العديد من العيوب، مما يؤثر على سلامة النموذج.

2. **نسبة تداخل 65%**

- جودة النسجة: هناك تحسن طفيف في وضوح النسيج، لكنه لا يزال غير كافٍ لتمثيل التفاصيل بدقة.
- الفجوات والثقوب: عدد الفجوات أقل من نسبة 58%، لكنها لا تزال واضحة في العديد من المناطق.
- تفاصيل السطح: تحسن بسيط في تفاصيل السطح، لكن لا تزال التشوهات تعوق التمثيل الدقيق.
- دقة الألوان: تحسنت الألوان قليلاً، لكنها لا تزال غير متناسقة مع الأصل.
- سلامة البنية: الهيكل يظهر تحسناً بسيطاً، لكن لا يزال هناك العديد من العيوب الهيكلية.

3. **نسبة تداخل 72%**

- جودة النسجة: تحسن ملحوظ في جودة النسيج، حيث أصبحت الحروف أكثر وضوحاً، لكن لا تزال بعض المناطق تعاني من ضبابية طفيفة.
- الفجوات والثقوب: الفجوات والثقوب بدأت تقل بشكل ملحوظ، لكن لا تزال هناك بعض الثقوب في الحواف والزوايا.
- تفاصيل السطح: تفاصيل السطح أصبحت أكثر وضوحاً، مع وجود بعض التشوهات البسيطة.
- دقة الألوان: الألوان أكثر دقة، لكنها لا تزال تعاني من بعض الانحرافات الطفيفة.
- سلامة البنية :الهيكل يظهر بشكل أفضل، لكنه لا يزال غير مكتمل بالكامل.

4. **نسبة تداخل 79%**

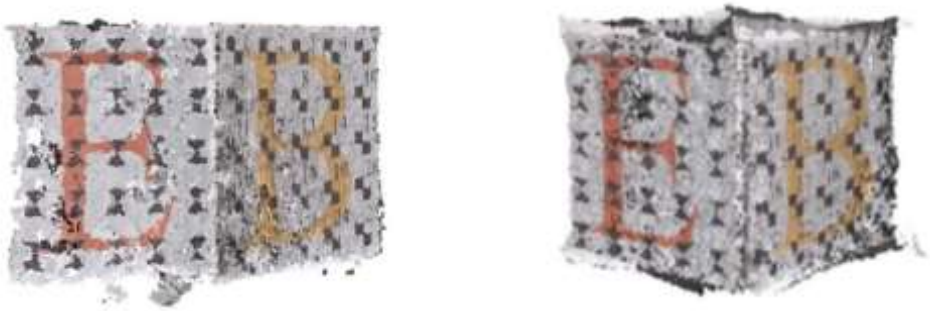
- جودة النسجة: النسيج واضح بشكل عام مع بعض التشوهات البسيطة. الحروف والألوان تظهر بدقة أعلى.
- الفجوات والثقوب: الفجوات أقل ظهوراً، مع وجود عيوب صغيرة في بعض المناطق الدقيقة.
- تفاصيل السطح: السطح يظهر بتفاصيل جيدة مع بعض التشوهات الطفيفة.
- دقة الألوان: الألوان أصبحت أكثر دقة وتناسقاً، مع وجود بعض الانحرافات الطفيفة.
- سلامة البنية: الهيكل متماسك بشكل جيد، مع وجود بعض العيوب الطفيفة التي لا تؤثر بشكل كبير.

5. **نسبة تداخل 86%**

- جودة النسجة: النسيج واضح جداً، والحروف والألوان تظهر بدقة كبيرة، مع وجود عدد قليل من العيوب في الحواف.
- الفجوات والثقوب: الفجوات والثقوب تكاد تكون معدومة، مع عدد قليل جداً من العيوب.
- تفاصيل السطح: تفاصيل السطح واضحة ودقيقة، مع الحد الأدنى من التشوهات.
- دقة الألوان: الألوان متطابقة تقريباً مع النموذج الأصلي، مما يشير إلى تحسن كبير في دقة التمثيل.
- سلامة البنية: الهيكل متكامل وقوي، مع عدد قليل جداً من العيوب الطفيفة.

6. **نسبة تداخل 93%**

- جودة النسجة: هذا النموذج هو الأكثر وضوحاً على الإطلاق. الحروف والألوان دقيقة جداً، بدون أي ضبابية أو تشوهات.
- الفجوات والثقوب: لا توجد تقريباً أي فجوات أو ثقوب، مما يشير إلى دقة عالية في النموذج.
- تفاصيل السطح: تفاصيل السطح ممتازة ودقيقة للغاية، بدون أي تشوهات.
- دقة الألوان: الألوان مثالية ومتطابقة مع الأصل، بدون أي انحرافات.
- سلامة البنية: الهيكل ممتاز ومتكامل تماماً، مما يجعله الأكثر تمثيلاً ودقة.



نسبة تداخل 86% **نسبة تداخل 79%**

الشكل (10) . القدرة التعبيرية لغمامات النقاط الكثيفة.

نلاحظ من خلال التقييم البصري للنماذج ان الحالات ذوات نسب التداخل (93%,86%,79%) نتج عنها نماذج جيد التمثيل لهندسية العنصر أما بالنسبة لباقي الحالات فهناك تشوه واضح في النموذج يزداد تأثيره مع انخفاض نسبة التداخل (الشكل (11)). من الصحيح أن زمن توليد الغمامات قد انخفض بشكل كبير ولكن هذا ليس لهذا العامل أهمية كبيرة هنا.

نسبة تداخل 65%

نسبة تداخل 72%

نسبة تداخل 58%

الشكل (11) . القدرة التعبيرية لغمامات النقاط الكثيفة كتابع لنسبة تداخل الصور.

جدول (3) التقييم البصري للنماذج ثلاثية الأبعاد

المعيار	تداخل 58%	تداخل 65%	تداخل 72%	تداخل 79%	تداخل 86%	تداخل 93%
جودة النسجة	ضبابي وغير واضح	تحسن طفيف، لا يزال ضبابي	وضوح متوسط، بعض الضبابية	وضوح جيد، بعض التشوهات	دقة عالية، وضوح جيد جدًا	ممتاز، بدون ضبابية أو تشوهات
الفجوات والثقوب	العديد من الفجوات	بعض الفجوات موجودة	فجوات أقل، لكن لا تزال موجودة	فجوات قليلة، عيوب طفيفة	فجوات نادرة، عيوب طفيفة جدًا	لا توجد فجوات تقريبًا
تفاصيل السطح	ضبابي، تشوهات كبيرة	تحسن طفيف، لا تزال تشوهات	تحسن ملحوظ، تشوهات طفيفة	جيد، بعض التشوهات البسيطة	دقة عالية، تشوهات نادرة	دقة ممتازة، بدون تشوهات
دقة الألوان	غير دقيقة، انحرافات واضحة	تحسن طفيف، لا تزال غير متناسقة	تحسن ملحوظ، ألوان متناسقة أكثر	ألوان دقيقة مع انحرافات طفيفة	ألوان دقيقة جدًا، تكاد تكون متطابقة	ألوان مثالية تقريبًا
سلامة البنية	غير مكتمل، تشوهات كبيرة	تحسن طفيف، عيوب تؤثر على السلامة	هيكل أفضل، عيوب أقل، غير مكتمل	هيكل جيد، عيوب طفيفة	هيكل متكامل، عيوب طفيفة جدًا	هيكل كامل ودقيق للغاية
التوصية	غير مناسب	غير مناسب	تحسن، لكن لا يزال غير كافٍ	جيد، لكن يمكن تحسينه	**أفضل توازن بين الدقة والكفاءة**	أعلى دقة تمثيل

النتائج توضح أن جودة النماذج ثلاثية الأبعاد تتحسن بشكل ملحوظ مع زيادة نسبة التداخل بين الصور. عند نسب التداخل 58%و65%، كانت النماذج تعاني من ضبابية في النسيج، ووجود فجوات وثقوب، وتشوهات في السطح والألوان. بينما بدأت التحسينات تظهر عند نسب 72% و79%، حيث تم تحسين وضوح النسيج وتقليل الفجوات، إلا أن بعض العيوب استمرت. عند نسبة التداخل 86%، أصبحت النماذج تتمتع بجودة عالية مع تفاصيل دقيقة وألوان متناسقة وفجوات أقل. في النهاية، حققت نسبة 93% أعلى دقة وجودة، لكنها تجاوزت النطاق المثالي المقترح، مما يجعل نسبة 86% الخيار الأمثل لتحقيق التوازن بين الدقة وكفاءة المعالجة.

الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المقدمة مسبقاً، نستنتج ما يأتي:

1. أهمية نسبة التداخل في تحسين الجودة الهندسية والدقة البصريّة للنماذج ثلاثية الابعاد: أظهرت نتائج الدراسة أن نسبة التداخل بين الصور المتعاقبة تؤثر بشكل كبير على جودة النماذج ثلاثية الأبعاد المتولدة باستخدام تقنية البنية من الحركة (SfM)، تم إثبات أن نسبة تداخل تبلغ 86% هي الأكثر كفاءة في تحسين جودة التثليث الصوري وتوليد غمامات النقاط الكثيفة. مقارنةً بنسبة 93%، التي لم تقدم تحسيناً كبيراً في الدقة الهندسية، ساهمت نسبة 86% في تقليل زمن المعالجة بنسبة 30% مع الحفاظ على جودة النتائج.
2. التوازن بين الدقة وكفاءة المعالجة: عند نسبة التداخل 86%، تم تحقيق توازن مثالي بين دقة التمثيل الهندسي وكفاءة زمن المعالجة، حيث بلغ عدد النقاط الكثيفة المستخرجة 1,239,627 نقطة وزمن معالجة الغمامات النقطية 4 دقائق و4 ثوانٍ.هذه النتيجة تثبت أن زيادة نسبة التداخل عن 86% لا تقدم تحسيناً ملحوظاً في كثافة الغمامات النقطية، بينما تزيد من التعقيد الزمني وكلفة المعالجة بشكل غير مبرر.

بناءً على التحليل التجريبي نوصي بما يلي:

1. يُوصى باستخدام نسبة تداخل تبلغ 86% عند تنفيذ عمليات المسح التصويري باستخدام تقنية SfM، حيث أن هذه النسبة توازن بين جودة النموذج ودقة التفاصيل من جهة، وكفاءة الوقت من جهة أخرى. هذا الخيار يوفر نتائج دقيقة مع تقليل زمن المعالجة بنسبة 30% مقارنة بنسب تداخل أعلى.
2. يُفضل تجنب استخدام نسب تداخل عالية تزيد عن 86%، مثل 93%، لأنها تزيد من تعقيد وزمن المعالجة دون تقديم تحسين كبير في جودة النموذج. حيث تبين أن زيادة نسبة التداخل من 86% إلى 93% لم تؤدِّ إلا إلى زيادة زمن المعالجة دون زيادة ملحوظة في كثافة النقاط أو دقة النموذج.
3. يُنصح بالتركيز على معايرة الكاميرات المستخدمة لضمان تحقيق أعلى مستويات الدقة في التثليث الصوري. يُعد ضمان ضبط الكاميرا بدقة أمراً بالغ الأهمية لضمان توافق نتائج الصور مع النماذج ثلاثية الأبعاد المولدة، خاصة عند العمل مع نسب تداخل منخفضة.
4. يُقترح إجراء دراسة مستقبلية متعمقة حول تأثير عدد نقاط الضبط وتوزيعها على الدقة الهندسية وجودة الغمامات النقطية. من المهم تحليل العلاقة بين توزيع النقاط وعدد النقاط الأمثل لتحقيق دقة أعلى في التثليث الصوري وتقليل الفجوات. يُوصى بالتركيز على كيفية تأثير استخدام نقاط ضبط أكثر أو أقل على النتائج، وذلك لتحديد العدد الأمثل الذي يوفر أفضل جودة وكفاءة معالجة.

References:

[1] HELLMAN T., LAHTI M.- *Photogrammetric 3D modeling for virtual reality*. 2018. https://www.researchgate.net/publication/327227913 [access: 28.06.2022].
[2] REMONDINO, F., SPERA, M.G., NOCERINO, E., MENNA, F., NEX, F.- *State of the art in high density image matching*. The Photogrammetric Record, vol. 29, 2014, pp. 144–166.
[3] MICHELETTI N., CHANDLER J.H., LANE S.N.- *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry*. Geomorphological Techniques, vol. 2, sec. 2.2, 2015, pp. 1–12.
[4] 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, vol. 179, 2012, pp. 300–314.
[5] VERHOEVEN G.J.J.- *Taking computer vision aloft – Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan.* Archaeological Prospection, vol. 18, 2011, pp. 67–73.
[6] LEWIŃSKA P., PARGIEŁA K.- *Comparative Analysis of Structure-From-Motion Software's – An Example of Letychiv (Ukraine) Castle and Convent Buildings*. Journal of Applied Engineering Sciences, vol. 8, no. 2, 2019, pp. 73–78.
[7] TORRES-SÁNCHEZ J., LÓPEZ-GRANADOS F., BORRA-SERRANO I., MANUEL PEÑA J.- *Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital sur- face model accuracy in olive orchards*. Precision Agriculture, vol. 19, no. 1, 2018, pp. 115–133.
[8] ONIGA E., BREABAN A.I., FLORIAN S.- *Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images*. Proceedings, vol. 2, no. 7, 2018, art. no. 352.
[9] HARWIN S., LUCIEER A., OSBORN J.- *The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis.* Remote Sensing, vol. 7, no. 9, 2015, pp. 11933–11953.
[10] < https://www.nck-web.org/boa-2020/324-drone-based-structure-from-motion-sfm-photogrammetry-analysis-of-mangrove-dynamics-in-the-prograding-delta-in-porong-indonesia> [access: 12.9.2024]
[11] < https://www.researchgate.net/figure/The-reconstruction-process-of-a-typical-SFM-method_fig2_341991603> [access: 12.9.2024]
[12] < https://www.researchgate.net/figure/Top-view-of-geometry-of-camera-motion-Two-successive-images-are-captured-by-rotating-a_fig1_3183262> [access: 12.9.2024]
[13] 12 Septembers 2024. <https://www.kigalidiscount.com/collections/cell-phones-smartphones/products/samsung-galaxy-j7-pro-64gb-dual-sim>
[14] AGISOFT METASHAPE. –*Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*. 2022, 180p.