Analysis the Effect of Control Points Number and their Distribution Patterns on 3D Model Accuracy in Close-Range Photogrammetry Applications

AlHussien Mayhoub *
Dr. Omar Al Khalil **

(Received 21 / 5 / 2025. Accepted 7 / 8 / 2025)

ABSTRACT

The accuracy of products generated by Structure from Motion (SfM) algorithms is influenced by various factors, including the ratio of photo overlap, image scale, the number of control points, their spatial distribution, the resolution of captured images, internal camera calibration parameters, and other related elements. This study aims to evaluate the impact of the number and spatial distribution patterns of control points on the accuracy of three-dimensional models produced through close-range photogrammetry. Control points serve as essential reference markers in photogrammetric workflows, playing a significant role in enhancing the precision of the final 3D model.

The research investigates several configurations that differ in the number and spatial arrangement of control points to determine how these variables affect model accuracy. Through comprehensive analysis of the resulting 3D models, the study identifies optimal strategies for the placement of control points to improve accuracy. The results indicate that the spatial distribution of control points has a substantial impact on the accuracy of 3D models. Among the tested patterns, edge distribution proved to be the most effective in achieving high accuracy with fewer points, while a combined central-edge distribution demonstrated consistent and reliable performance across different point quantities. In contrast, although random distribution showed strong initial results, its performance became unstable as the number of control points increased.

Keywords: Close-Rang Photogrammetry, 3D point cloud, SfM Algorithm, Control Points.

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

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

دراسة تأثير عدد نقاط الضبط وأنماط توزعها على دقة النماذج ثلاثية الأبعاد في تطبيقات المسح التصويري القريب

الحسين محمد ميهوب *

الدكتور عمر محمد الخليل **

(تاريخ الإيداع 21 / 5 / 2025. قُبِل للنشر في 7 / 8 / 2025)

ملخّص

تتأثر دقة المنتجات الناتجة عن خوارزميات إعادة بناء الهيكل من الحركة (Structure from Motion) بعدد من العوامل، منها نسبة تداخل الصور، مقياس الصورة، عدد نقاط التحكم، نمط توزيع هذه النقاط مكانياً، دقة الصور الملتقطة، ومعاملات المعايرة الداخلية للكاميرا، بالإضافة إلى عوامل أخرى. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير عدد نقاط التحكم وأنماط توزيعها المكاني على دقة النماذج ثلاثية الأبعاد الناتجة عن تقنيات التصوير الفوتوغرافي القريب المدى. وتُعد نقاط التحكم عناصر مرجعية أساسية في عمليات المسح التصويري، حيث تسهم بشكل كبير في تحسين دقة النموذج النهائي ثلاثي الأبعاد.

تتناول الدراسة تقييم عدة تكوينات تختلف في عدد نقاط التحكم وطريقة توزيعها المكاني، وذلك من أجل تحديد مدى تأثير كل منها على دقة النماذج. ومن خلال تحليل النماذج ثلاثية الأبعاد الناتجة، تم التوصل إلى استراتيجيات مثلى لتحديد مواقع نقاط التحكم بما يضمن تعزيز دقة النماذج. وتُظهر النتائج أن نمط توزيع نقاط التحكم يلعب دوراً محورياً في تحديد دقة النموذج، حيث أثبت التوزيع على الأطراف فعالية كبيرة في تحقيق دقة عالية باستخدام عدد محدود من النقاط، في حين أن التوزيع الذي يجمع بين المركز والأطراف أظهر أداءً مستقراً وموثوقاً عبر مختلف أعداد النقاط. أما التوزيع العشوائي، فرغم تقديمه أداءً جيداً في البداية، إلا أن فعاليته تصبح غير مستقرة عند زيادة عدد النقاط.

الكلمات المفتاحية: اقتطاع البنية من الحركة، نقاط ضبط، غمامة نقاط ثلاثية الأبعاد، مقارنة الغمامات، دقة مطلقة.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

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

** أستاذ . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة اللاذقية(تشرين سابقاً) . اللاذقية . سوريا.
omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

مقدّمة:

المسح التصويري هو تقنية متعددة الاستخدامات للحصول على قياسات دقيقة وتمثيلات للعناصر والاشياء من خلال التقاط وتحليل الصور المتداخلة، وقد استخدمت لأكثر من قرن. تستفيد هذه الطريقة من مبادئ الهندسة والبصريات لإعادة بناء النماذج ثلاثية الأبعاد من الصور ثنائية الأبعاد. تطورت التقنية مع تقدم التصوير الرقمي وتطور الحواسيب لتشمل مجالات الهندسة المعمارية والآثار والهندسة والارصاد البيئة. يُستخدم المسح التصويري في مشاريع الخرائط واسعة النطاق مثل النماذج الرقمية للارتفاعات (Digital Terrain Models (DTMs ، ويشمل المسح التصويري الجوي التقاط الصور من المركبات والطائرات دون طيار(Drones). وفي المسح التصويري قريب المدى –Close Rang Photogrammetry، تُلتقط الصور من مسافات قريبة لالتقاط تفاصيل دقيقة، مما يجعله مثاليًا للتوثيق العلمي والفحوصات التقنية والتطبيقات التي تتطلب دقة عالية في التفاصيل.

ومع 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].

تعمل خوارزميات إعادة بناء الهيكل من الحركة (Structure from Motion – SfM) على البحث عن النقاط المشتركة بين الصور المتداخلة، ومن ثم يتم تطبيق تعديل الحزم (Bundle Adjustment) ضمن بلوكات الصور بهدف تحسين حساب مواقع وآليات توجيه آلة التصوير، وذلك باستخدام تقنية التثليث الصوري–Photo) triangulation)بعد ذلك، يُجرى التوجيه المطلق (Absolute Orientation) لربط بلوك الصور بنظام إحداثيات معلوم، من خلال استخدام نقاط الضبط الأرضية. كما تُطبّق خوارزميات ربط الصور (Image Matching) من أجل إنتاج غمامة نقاط كثيفة.[3] (Dense Cloud)

أما بالنسبة للدقة الهندسية للمنتجات الناتجة عن خوارزمياتSfM ، فهي تتأثر بعدة عوامل، من بينها نسبة التداخل بين الصور[4] (Photo Overlap) ، ومقياس الصور (المرتبط بمسافة التراجع بين آلة التصوير والعنصر المصوّر)، وعدد نقاط الضبط وتوزيعها المكاني [5]، ودقة تمييز الصور المستخدمة (Image Resolution)، بالإضافة إلى معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير المستخدمة [6].

وقد تناولت الدراسات الحديثة بشكل واسع تأثير العديد من المعايير على دقة هذه النماذج، مع التركيز بشكل خاص على عدد وتوزيع نقاط الضبط (CPs). وقد تبين أن "زيادة عدد نقاط الضبط تؤدي إلى دقة أعلى في النتائج النهائية، مثل غمامات النقاط أو شبكة السطوح ثلاثية الأبعاد أو الصور المصححة عموديا (الأورثوفوتو) أو النموذج الرقمي للأسطح (DSM). ومع ذلك، فإن تجاوز عدد معين من نقاط الضبط قد يؤدي إلى انخفاض الجدوى من العمل، حيث تصبح "عملية تستغرق وقتاً طويلاً، سواء في الميدان أو حسابياً [5].

فيما يتعلق بتوزع نقاط الضبط، " أفقياً: يجب توزيع النقاط على كامل الهدف المدروس، عدم تجميع النقاط في جهة واحدة، يُفضل أن تغطي النقاط زوايا المشهد، إضافة نقاط في المنتصف.

رأسياً: وضع نقاط على ارتفاعات مختلفة" [7]. هذا يضمن أن النموذج الثلاثي الأبعاد المُنشأ يحافظ على دقة عالية أفقياً وشاقولياً. وعلى وجه الخصوص، فإن "وضع نقاط الضبط حول حافة منطقة الدراسة يقلل من الأخطاء، في حين أن التوزيع المنتظم داخل المنطقة يقلل من الأخطاء الارتفاعية" [8]. تؤكد دراسات المسح التصويري قريب المدى على أهمية تحسين كل من عدد وترتيب نقاط الضبط لتحسين دقة إعادة البناء الثلاثي الأبعاد، خصوصاً للأجسام المعقدة والتفاصيل الدقيقة.

وعلاوة على ذلك، فقد ثبت أن استخدام تقنيات المسح التصويري مثل اقتطاع البنية من الحركة (SfM) والتصوير متعدد الرؤى(MVS) ، التي "تحسب تلقائياً معاملات التوجيه الداخلية والخارجية بناءً على إحداثيات الصورة للنقاط المشتركة"، يمكن أن يولد نماذج عالية الدقة حتى بدون عدد كبير من نقاط الضبط [8]. ومع ذلك، في التطبيقات التي تتطلب دقة دون المليمترات، يظل الاختيار الدقيق وتوزيع نقاط الضبط أمراً لا غنى عنه. لذلك، فإن الأبحاث حول "العدد الأمثل لنقاط الضبط وتوزيعها المكاني لا تزال موضوع اهتمام" [9]، خصوصاً في سياق المسح التصويري قريب المدى ، حيث تتطلب التفاصيل الدقيقة والهياكل صغيرة الحجم دقة أعلى.

سعينا في هذا البحث لتقديم منهجية تركز فقط على تأثير تغير عدد نقاط الضبط وأنماط توزعها على دقة التثليث الصوري وعلى دقة وكثافة غمامات النقاط المولّدة باستخدام طريقةSfM. تم ذلك مع الحدّ من تأثير كل العوامل الأخرى المؤثرة على هذه الدقة. والعوامل التي ثبتناها هي نسب تداخل الصور، مسافة التراجع، دقة تمييز الصور المستخدمة وكذلك معاملات معايرة آلة التصوير

أهمية البحث وأهدافه:

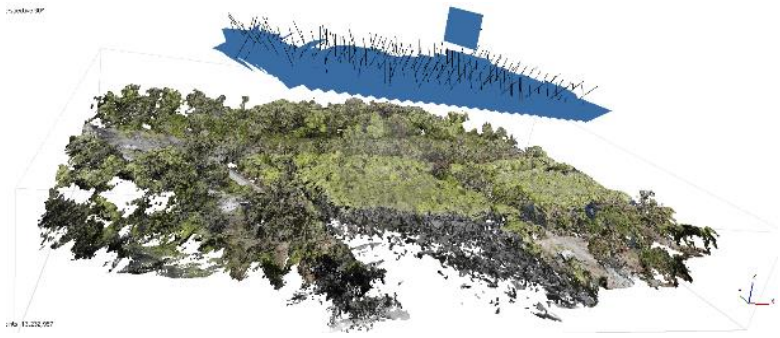
تكمن أهمية البحث في محاولته دراسة تأثير عدد نقاط الضبط وأنماط توزيعها على دقة النماذج ثلاثية الأبعاد الناتجة عن عمليات المسح التصويري القريب. كما يسعى البحث إلى تحديد الأنماط المثلى لتوزيع نقاط الضبط بما يحقق أعلى درجات الدقة. يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية:

1. التحقيق بشكل تجريبي في تأثير عدد نقاط الضبط وأنماط توزعها على دقة التثليث الصوري في عمليات المسح التصويري القريب.
2. تحليل كيفية تحسن دقة التثليث الصوري من خلال تحديد الأنماط المثلى لتوزيع نقاط الضبط واختبار تأثيرها على عملية إنتاج النماذج.
3. تقييم دقة وكمالية منتجات خوارزميات الـ SfM بعدة طرائق وذلك عن طريق مقارنة الغمامات باستخدام خوارزمية تحسب المسافات بين نقاطها.

طرائق البحث ومواده:

1- تقنية اقتطاع البنية من الحركة (SfM)

تُستخدم تقنية إعادة اقتطاع البنية من الحركة (SfM) في المساحة التصويرية التحليلية بهدف إنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد من خلال تحليل مجموعة من الصور الملتقطة من زوايا مختلفة. وتعتمد هذه التقنية على تحديد ومطابقة النقاط أو العناصر المشتركة بين الصور المتعددة، مما يسمح بإعادة بناء البنية ثلاثية الأبعاد للمشهد بشكل دقيق، اعتماداً على مبادئ التثليث الصوري وتحليل حركة الكاميرا بالنسبة للعناصر المصوّرة.

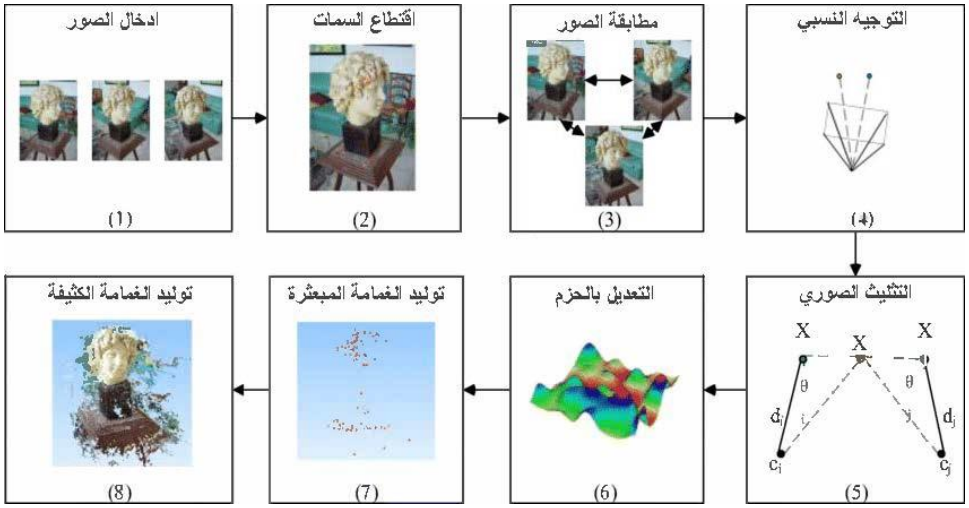


المصدر: من [10]

الشكل (1) مثال عن تطبيق تقنية SfM

تبدأ عملية (SfM) بمطابقة الصور باستخدام خوارزميات متخصصة، مثل خوارزميةSIFT ، التي تعمل على تحديد السمات أو النقاط المشتركة بين الصور المختلفة. بعد تحديد هذه النقاط، يتم تنفيذ التوجيه النسبي للصور، حيث تُحسب التحولات (الانتقال والدوران) بين الصور ضمن إطار مرجعي ثلاثي الأبعاد يُمكّن من تحديد مواضع الكاميرات واتجاهاتها النسبية.

تتبع هذه الخطوة مرحلة التثليث الصوري، والتي يتم فيها قياس مواقع النقاط المتطابقة على الصور المختلفة من أجل تقدير إحداثياتها في الفضاء ثلاثي الأبعاد. ويُستخدم في هذه المرحلة التثليث الصوري المؤتمت، وهو مدعوم بتقنية تعديل الحزم (Bundle Adjustment)، التي تُطبّق لمعالجة وتحسين نتائج التقدير بشكل تكراري، وذلك من خلال تقليل الفروقات بين الإحداثيات المحسوبة والإسقاطات المتوقعة، بهدف الحصول على نماذج ثلاثية الأبعاد عالية الدقة.



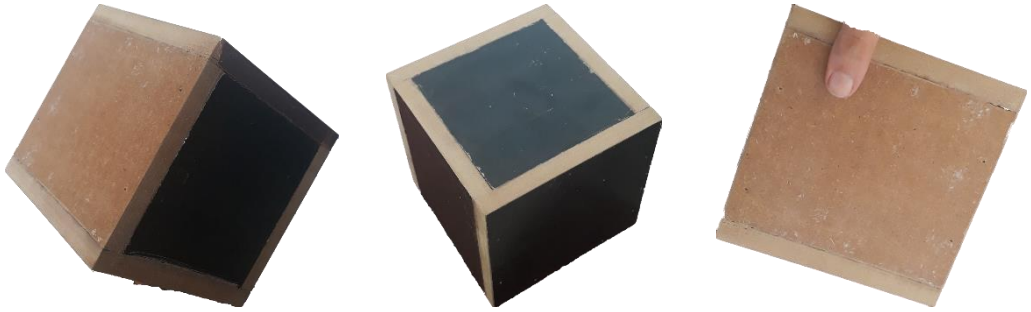
المصدر: من [11]

الشكل 2() خطوات النمذجة بتقنية SfM

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.

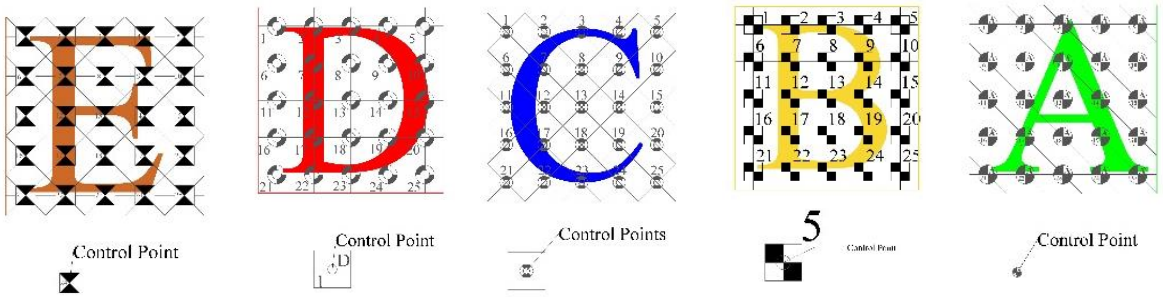
2- عنصر التجربة

يتألف عنصر التجربة من مكعب طول حرفه 15 cm مصنوع من الخشب الصناعي بخطأ نسبي في الأبعاد 0.667% (15cm ±1mm) صُنِع من قبل نجّار مختص راعى فيه أقصى معايير الدقة الممكنة في التصنيع من أبعاد وتعامد زوايا. تم تزويد المكعب بأوجه لاصقة تحوي كل منها 25 نقطة ضبط صناعية بأشكال ونقشات مختلفة لضمان التنوع في نسجة العنصر ولتلافي حدوث ارتباك أو خطأ في النمذجة ناتج عن تطابق النسجة.



الشكل (3) عنصر الاختبار.

تم تكثيف نقاط الضبط على سطح عنصر الاختبار وتوزيعها بشكل متجانس ومتناسق لغاية التجريب، حيث تم وضع 5 صفوف وكذلك 5 أعمدة من نقاط الضبط على كل وجه من أوجه المكعب بحيث تظهر كتوزع مصفوفي يغطي مساحة عنصر الاختبار ويحقق الغرض المراد من التجربة، أُعطي لكل وجه من الوجوه ترميز بإحدى الأحرف اللاتينية (A,B,C,D,E) ولون خاص ليتم تمييزه.



الشكل (4) نقاط الضبط الصناعية

في بحثنا هذا كان المطلوب تثبيت كل العوامل التي تؤثر على دقة التثليث الصوري ودقة وكثافة غمامات النقاط التي تمثل النموذج ثلاثي الابعاد للعنصر بما في ذلك نسبة تداخل الصور وظروف الإضاءة وشروط معايرة آلة التصوير. وفقط دراسة تأثير تغير عدد وتوزع نقاط الضبط.

3- آلة التصوير الرقمية المستخدمة

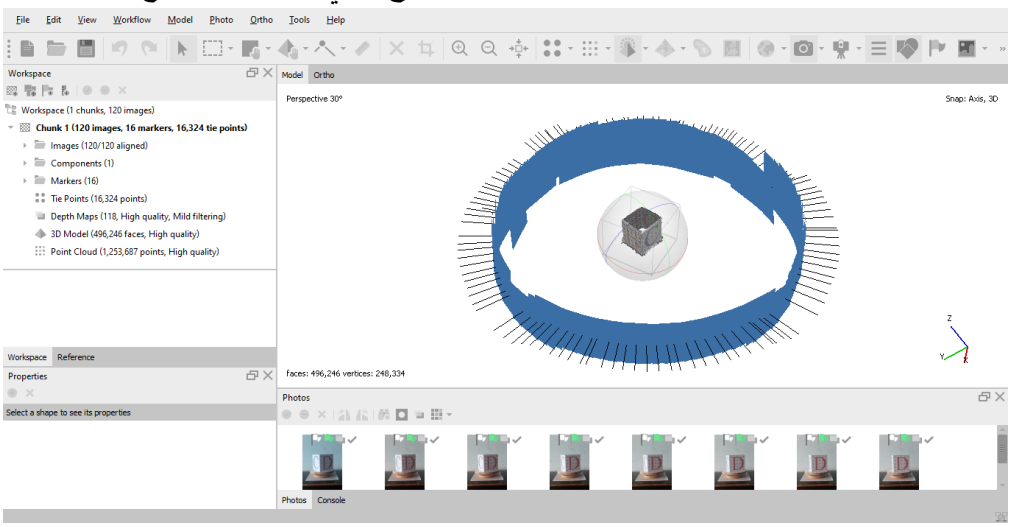
تم استخدام آلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقّال Samsung J7 (الشكل 5) ذات دقة التمييز 10 Megapixel ومقاس صورة مساو لـ 5.18 mm x 2.91 mm وبعد محرقي 3.71mm. تبلغ أبعاد البكسل في الصورة 1.26 ميكرون.

المصدر من :[12]

الشكل (4). آلة التصوير الرقمية المستخدمة في البحث.

4- البرنامج المستخدم

تتوفر العديد من البرمجيات التي تُستخدم في نمذجة الأجسام ثلاثية الأبعاد بالاعتماد على تقنية إعادة بناء الهيكل من الحركة .(Structure from Motion – SfM) وتتوزع هذه البرمجيات بين مفتوحة المصدر (مجانية)، مثل برنامج VisualSFM وبرنامج PMVS2، وبين برمجيات تُقدَّم على شكل خدمات عبر الإنترنت(Web Services) ، مثل Autodesk Photoflyو123D Catch، إلا أن هذا النوع الأخير يعاني من بعض القيود، من أبرزها محدودية حجم البيانات التي يمكن معالجتها، ومحدودية جودة النتائج الناتجة. كما توجد برمجيات تجارية أكثر تطورًا، من أبرزها برنامج Agisoft Metashape والبرنامج PhotoModeler Scanner. ويُعد برنامج Agisoft Metashape، وهو البرنامج المستخدم في هذا البحث، من بين أفضل البرمجيات المتخصصة في تطبيق تقنيةSfM ، وذلك مقارنةً بالخيارات الأخرى المتاحة. يتميّز البرنامج بواجهة استخدام تفاعلية وسهلة (انظر الشكل(6))، كما يتيح للمستخدم تقييم جودة النتائج النهائية وربط النموذج الناتج مع أي نظام إحداثيات. ويمتلك البرنامج قدرة على معالجة الصور الجوية والصور الأرضية على حد سواء، بالإضافة إلى إمكانية تصدير النموذج ثلاثي الأبعاد بعدة صيغ مختلفة.[13]



الشكل (5). الواجهة الرئيسية للبرنامج Agisoft Metashape.

النتائج والمناقشة:

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

1) تصميم التجربة.

2) تحضير معطيات الضبط Control data والتي تفيد في حساب هندسية النموذج وتقييم دقته الهندسية وتوضيعه ضمن نظام إحداثيات مرجعي.

3) وضع منهجية محددة لدراسة تغير عدد نقاط الضبط وأنماط توزعها.

4) معالجة البيانات: إنجاز التثليث الصوري وتوليد الغمامات ثلاثية الأبعاد للعنصر وفق حالات الدراسة المختلفة، وتقييم النتائج من ناحية الدقة الهندسية والكمالية.

أولاً: تحضير معطيات الضبط

تأخذ معطيات الضبط شكل نقاط ضبط صناعية موزعة على مختلف أجزاء العنصر. إن إنجاز هذه المرحلة يتطلب القيام بأعمال جيوديزية (أفقية وشاقوليه) تقليدية. وللحصول على معطيات الضبط الخارجي كان لابد أولاً من تأسيس شبكة استناد مساحية مكونة من النقاط المرجعية (الشكل (7)) ومن ثم استخدامها في حساب الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لنقاط الضبط الموزعة على العنصر. وفيما يخص هذه الشبكة، فقد تم إنشاؤها وفق المراحل التالية:

1) اختيار مواقع نقاط شبكة الاستناد.

2) تجسيد نقاط الشبكة، رصد النقاط واختبار بنية الشبكة.

3) تعديل الشبكة وحساب الإحداثيات الأفقية للنقاط.

4) حساب الإحداثيات الشاقولية لنقاط الشبكة.

5) اختيار مواقع نقاط الضبط على أجزاء العنصر.

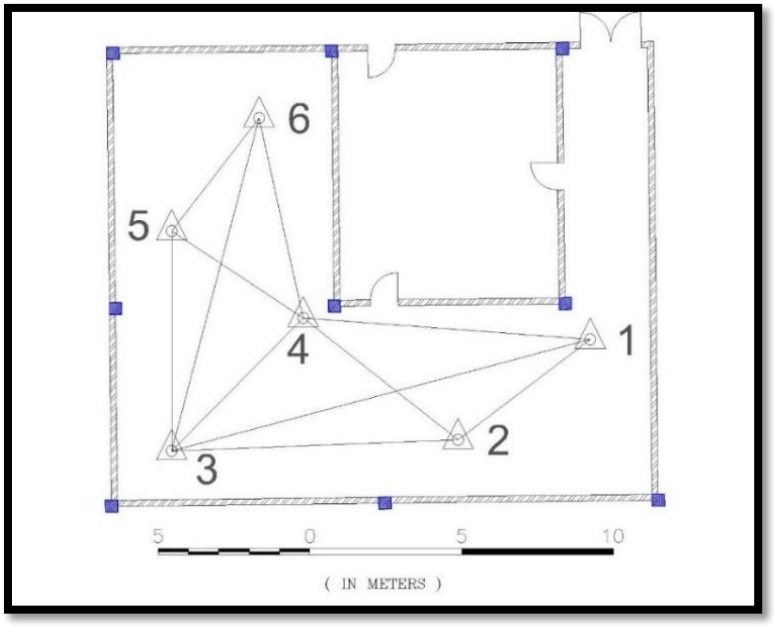
6) حساب إحداثيات نقاط الضبط على أجزاء العنصر.

تم استخدام جهاز المحطة المتكاملة Leica TS09 في قياس الاتجاهات والمسافات الأفقية بين نقاط شبكة الأساس حيث تم قياس الاتجاهات والمسافات الأفقية لنقاط الشبكة. يعد الجهاز Leica TS-09 من الأجهزة الحديثة والدقيقة، ويتميز بإمكانية إجراء التمركز والقياس عن طريق شعاع ليزري، مع إمكانية حساب الإحداثيات بشكل آلي بعد إدخال البيانات المناسبة (مسافات، اتجاهات). ويوضح (الجدول (1)) دقة قياس المسافات والزوايا بهذا الجهاز.

جدول (1). مواصفات جهاز المحطة المتكاملة Leica TS-09.

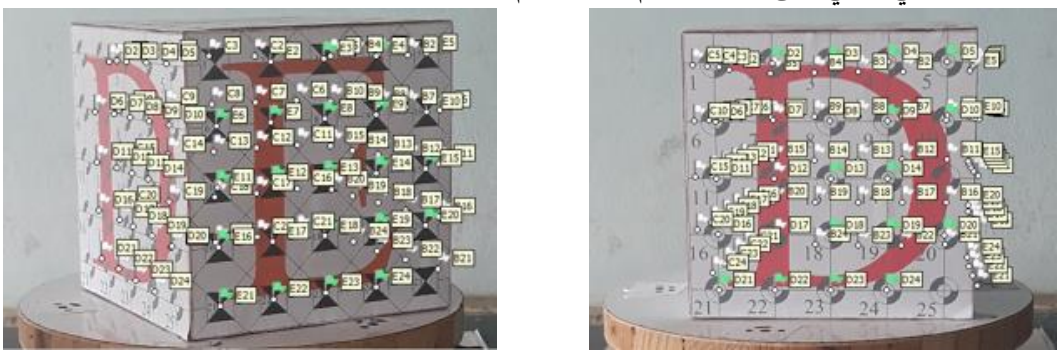
قياس الزوايا	
الدقة	**1"(0.3 mgon) / 2"(0.6 mgon)**
	3"(1 mgon) / 5"(1.5 mgon)
قياس المسافات	
الدقة	**Precise:1.5 mm + 2.0 ppm**
	Precise Fast: 2.0 mm + 2.0 ppm
	Tracking: 3.0 mm + 2.0 ppm

بعد إنهاء عمليات الرصد واختبار بنية الشبكة، تم تعديل الشبكة الأفقية بالنسبة لجملة إحداثيات محلية، فكان الخطأ متوسط التربيع على واحدة الوزن هو 3 mm.



الشكل(6). شبكة الأساس المساحي.

فيما يخص الإحداثيات الشاقولية لنقاط الشبكة، قمنا بعمل تسوية غير مباشرة باستخدام الجهاز Total Station Leica TS09 وتم قياس فروق الارتفاعات من كل نقطة إلى بقية النقاط وتم تعديل النتائج باستخدام البرنامج Excel للحصول على الارتفاعات المعدلة. تم الحصول على خطأ متوسط تربيع 1mm في تعيين الإحداثيات الشاقولية لنقاط الشبكة. بالنسبة لنقاط الضبط على عنصر التجربة (الشكل (9))، فقد تم التعامل معها كما يتم التعامل مع نقاط الرفع التفصيلي أي أننا حسبنا إحداثياتها بالطريقة المباشرة (زاوية ومسافة وفرق ارتفاع). وبما أنه يمكن رؤية أغلب هذه النقاط من نقطتي شبكي على الأقل، فقد تم اعتماد القيم المتوسطة لهذه الاحداثيات.



الشكل (7) . توزع نقاط الضبط على عنصر التجربة.

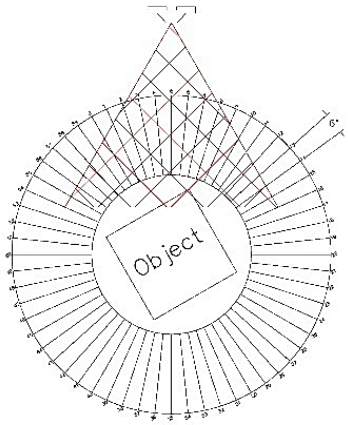
ثانياً: التقاط الصور

تم التقاط الصور عن مسافة تساوي D=80 cm وبالتالي سيكون مقياس الصور:

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

حيث f هو البعد المحرقي لآلة التصوير.

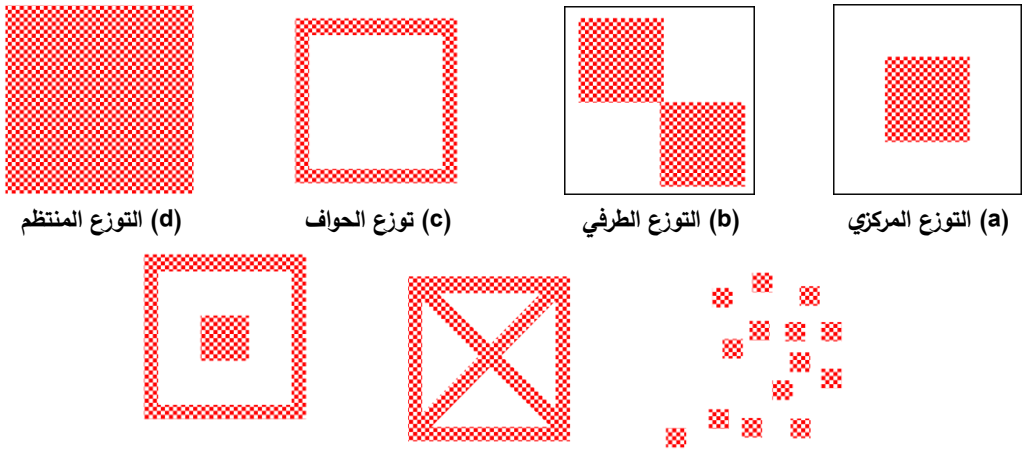
تم اجراء جميع مراحل الدراسة على عينة الصور التي تحقق نسبة تداخل 86% بفرض انها الخيار الأمثل لتحقيق التوازن بين الدقة وكفاءة المعالجة، بالتالي عدد الصور الكلي 60 صورة



الشكل (8) آلية تصوير العنصر بنسبة تداخل 86%

ثالثاً: منهجية دراسة المتغيرات

قمنا بتعريف 7 أنماط من توزع نقاط الضبط وهي (التوزع المركزي، التوزع الطرفي، توزع الحواف، التوزع المنتظم، التوزع العشوائي، توزع الحواف–القطري، توزع الحواف–المركزي). كذلك بالنسبة لعدد النقاط عرّفنا 8 مجموعات من النقاط تبدأ ب 4 نقاط وتزداد بالتدريج كما يلي (64, 48, 32, 24, 16, 12, 8, 4)، في المجموع 7 (أنماط توزع) × 8 (مجموعات من النقاط) = 56 (مشروعاً تم انجازه)، تم في كل مشروع على حده توجيه الصور وحساب غمامات النقاط المبعثرة والكثيفة لنموذج الاختبار، تمهيداً للإجراء الدراسة والتحليل عليها.



(a) التوزع المركزي **(b) التوزع الطرفي** **(c) توزع الحواف** **(d) التوزع المنتظم**

(e) التوزع العشوائي **(f) توزع الحواف–القطري** **(g) توزع الحواف–المركزي**

الشكل 9() أنماط توزع نقاط الضبط

(a) التوزع المركزي: توضع فيه النقاط في مركز منطقة الدراسة

(b) التوزع الطرفي: توضع فيه النقاط في أحد زوايا منطقة الدراسة

(c) توزع الحواف: توضع فيه النقاط على حواف منطقة الدراسة

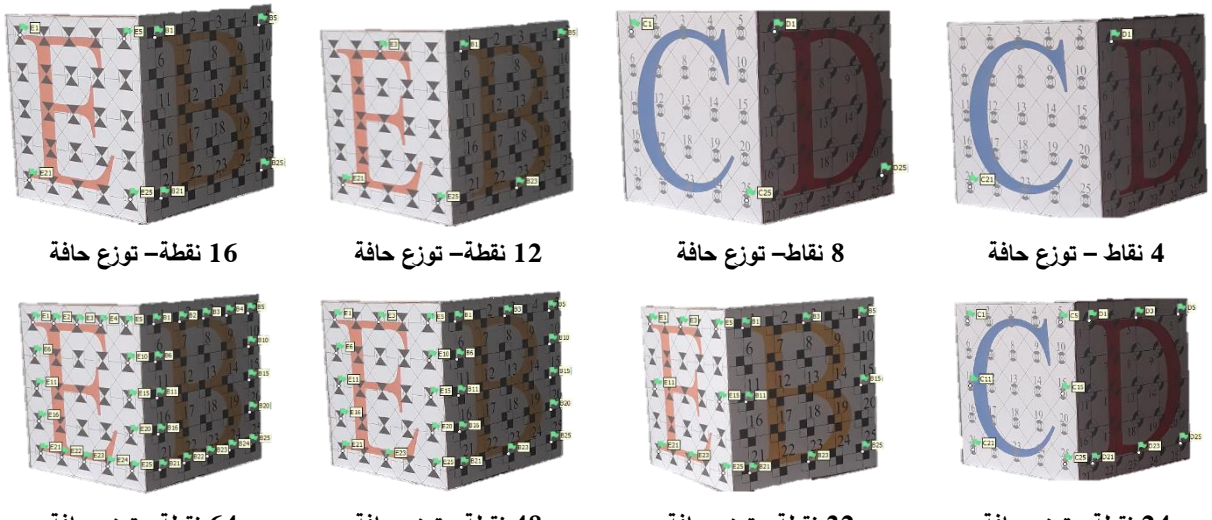
(d) التوزع المنتظم: توضع فيه النقاط بشكل منتظم في كامل منطقة الدراسة

(e) التوزع العشوائي: توضع فيه النقاط بشكل عشوائي في كامل منطقة الدراسة

(f) توزع الحواف–القطري: توضع فيه النقاط على حواف منطقة الدراسة وبشكل قطري يصل بين الزوايا

(g) توزع الحواف–المركزي: توضع فيه النقاط على حواف

منطقة الدراسة وفي مركزها

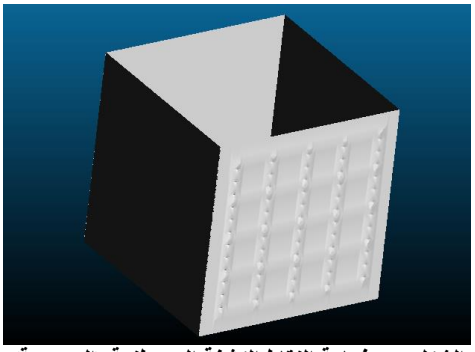


4 نقاط – توزع حافة | 8 نقاط– توزع حافة | 12 نقطة– توزع حافة | 16 نقطة– توزع حافة

24 نقطة– توزع حافة | 32 نقطة– توزع حافة | 48 نقطة– توزع حافة | 64 نقطة– توزع حافة

الشكل 10() مثال عن نمط توزع عينة الحواف في كل مجموعة من النقاط

يمكننا تقييم الدقة الهندسية للغمامات الكثيفة من أجل كل حالة عبر مقارنة هذه الغمامات مع غمامة مرجعية ذات كثافة عالية. للقيام بذلك، قمنا بتصميم غمامة نقاط كثيفة مرجعية تمثل هندسية العنصر باستخدام البرنامج CloudCompare (V2) بالاستفادة من كون عنصر التجربة منتظم وذو ابعاد وهندسية معلومتين. قمنا بتوليد الغمامة الكثيفة الصناعية للعنصر مكعبي الشكل ذي طول الحرف 15 cm بكثافة 12 مليون نقطة كما يوضح الشكل.



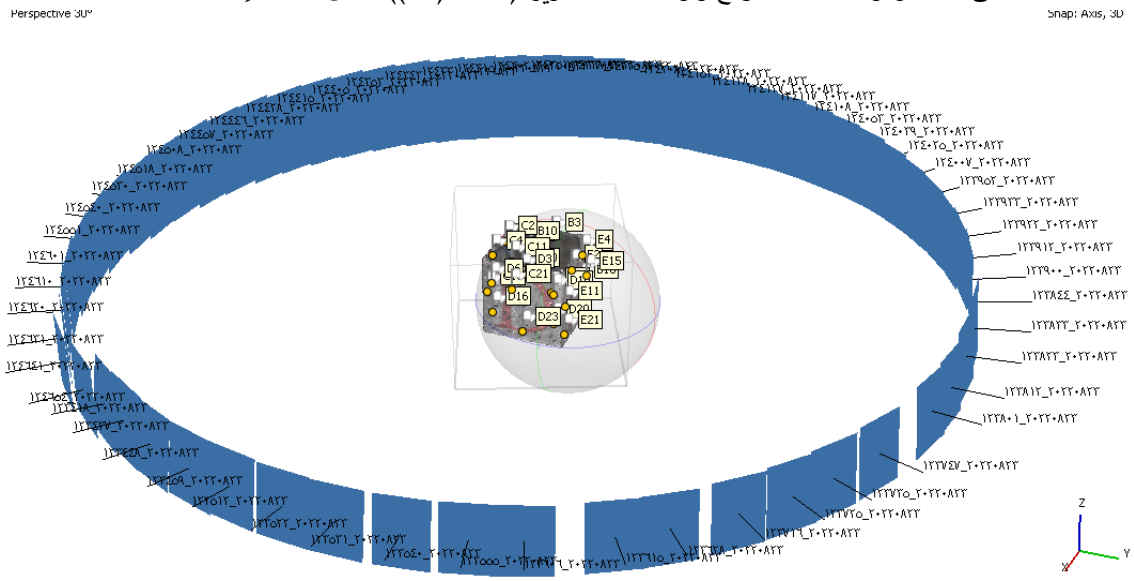
الشكل 11 غمامة النقاط الكثيفة المصطنعة (المرجعية)

رابعاً: معالجة البيانات

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.

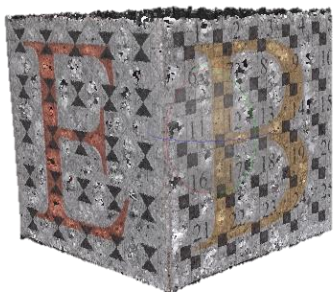
تمت عملية توجيه صور العنصر لكل حالة من حالات التجربة باستخدام حاسوب له المواصفات التالية: RMA 8 GB, Core i5 مع اعتماد مستوى المعالجة العالي (استخدام دقة التمييز الكاملة للصور).

فيما يلي مثال عن عملية التوجيه في حالة التوزيع المنتظم ب 12 نقطة ضبط انطلاقا من صور ملتقطة بنسبة تداخل 86%، حيث تم استخدام 60 صورة التقطتها آلة التصوير. تم توجيه الصور بشكل نسبي ضمن حيّز العنصر وذلك باستخدام 9,324 نقطة ربط استشعرها البرنامج آلياً عند مستوى المعالجة المستخدم بعد ذلك تم استخدام كل نقاط الضبط المقاسة على العنصر وذلك لتحديد مواقع وتوجيه آلة التصوير (الشكل (13)) ضمن جملة الإحداثيات المحلية المعتمدة.



الشكل (12) . مواقع وتوجيه آلة التصوير ضمن جملة إحداثيات العنصر بمساعدة نقاط الضبط.

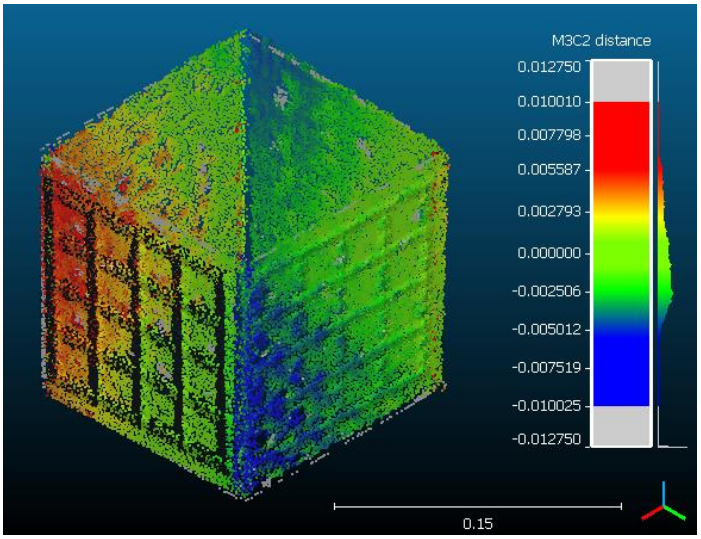
تم بعد ذلك حساب غمامة النقاط الكثيفة عند مستوى المعالجة العالي فكان عدد نقاطها937,999 نقطة (الشكل (14)).



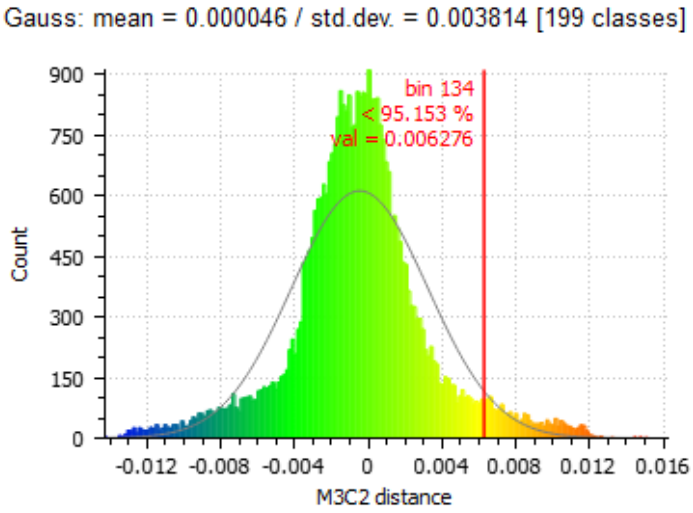
الشكل (13) . غمامة النقاط الكثيفة للعنصر في حالة التوزع المنتظم 24 نقطة ضبط.

تم تحديد دقة كل غمامة باستخدام الخوارزمية Multiscale Model–to–Model Cloud Comparison (M3C2) وهي أكثر الخوارزميات تطوراً من أجل مقارنة غمامة مع غمامة أخرى وهي تحسب المسافات بإشاراتها على طول النواظم على السطح وهي لا تتطلب استقراء السطوح وتعدّ مفيدةً خاصةً من أجل العناصر ثلاثية الأبعاد المعقّدة. يتألف تدفق العمل في الخوارزمية M3C2 بشكل أساسي من خطوتين وهي تقوم بمقارنة نقاط غمامة مع غمامة أخرى باستخدام نواظم السطح والتي تتبع لخشونة السطح وتقيس التغير الحاصل على طول اتجاه الناظم [14].

يوضح الشكل التالي غمامة الفروقات بين الغمامة الكثيفة في حالة التوزع المنتظم باستخدام 12 نقطة ضبط وغمامة النقاط المرجعية الكثيفة (الشكل 12). بلغت قيمة الانحراف المعياري على هذه الفروقات 3.8 mm كما كان أكثر من 95.15 % من الفروقات أقل من 6.3 mm (الشكل 15).

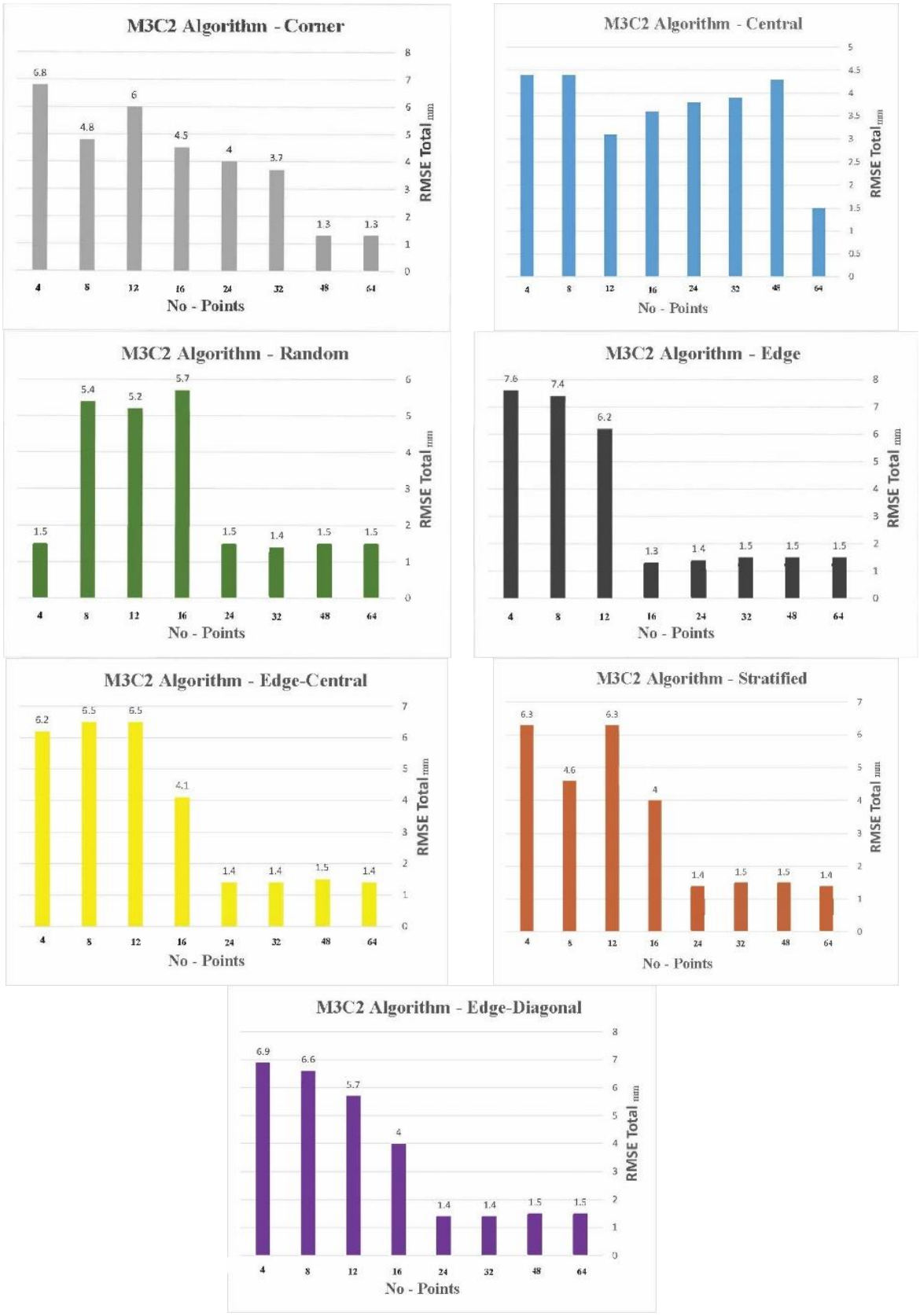


الشكل (14) . غمامة الفروقات بين الغمامة مرجعية و الغمامة في حالة التوزع المنتظم باستخدام 24 نقطة ضبط.



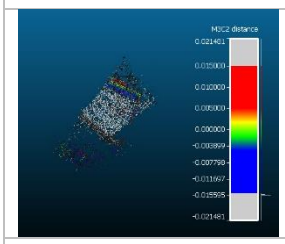
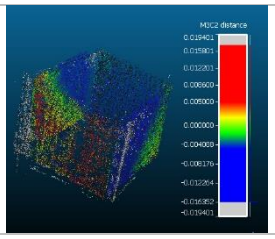
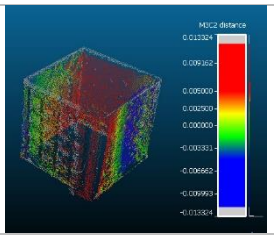
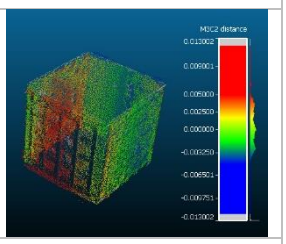
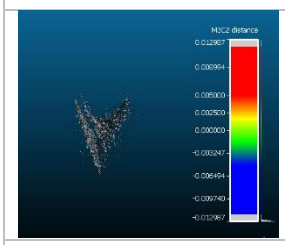
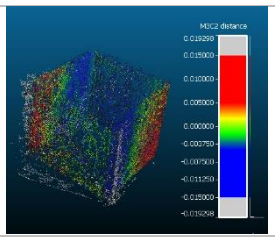
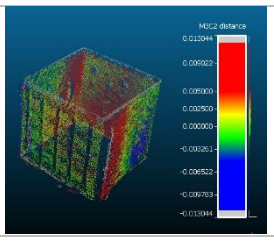
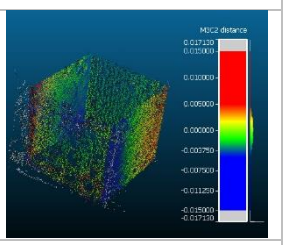
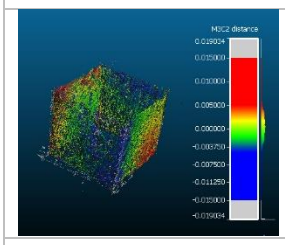
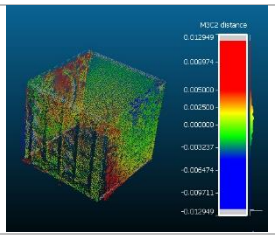
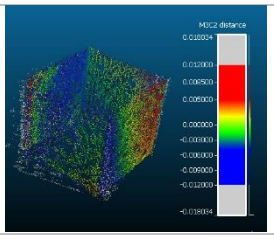
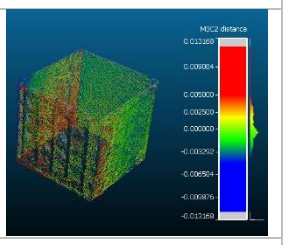
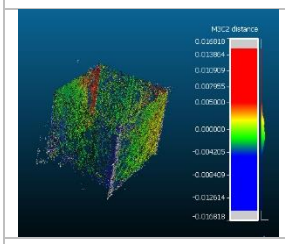
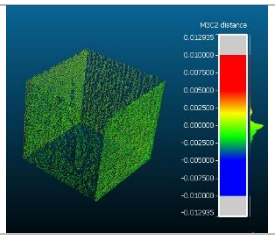
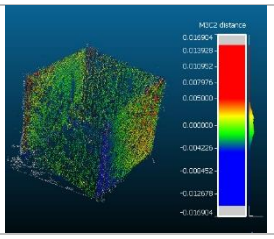
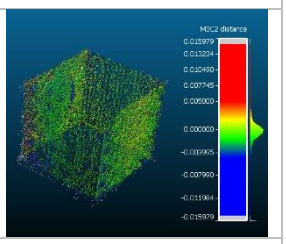
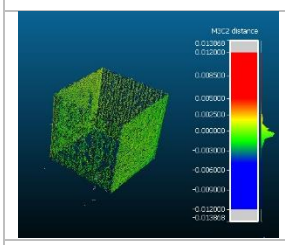
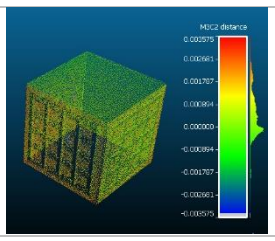
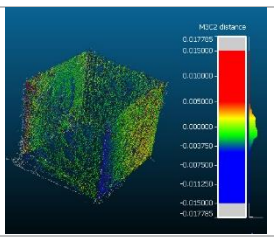
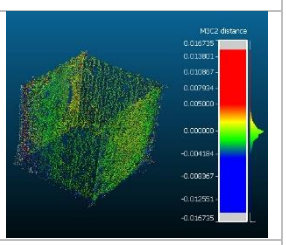
الشكل 15() هيستوغرام الفروق بين الغمامة المرجعية و الغمامة في حالة التوزع المنتظم باستخدام 24 نقطة ضبط.

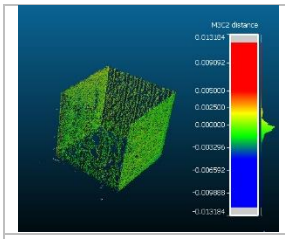
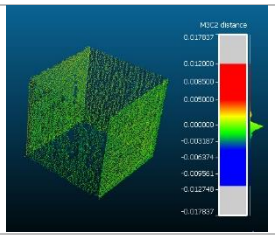
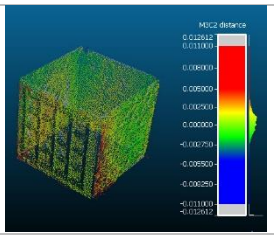
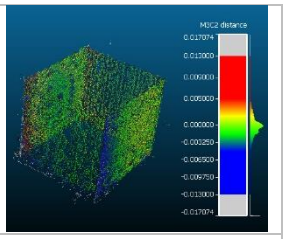
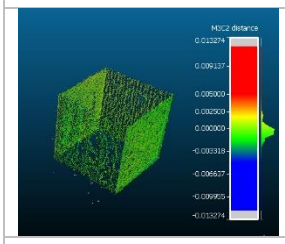
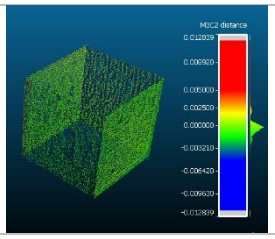
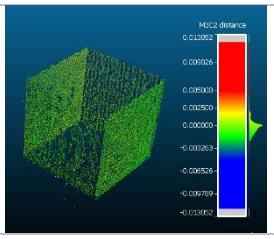
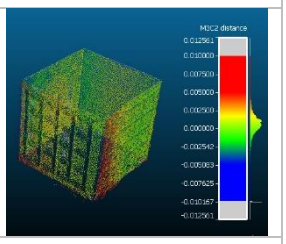
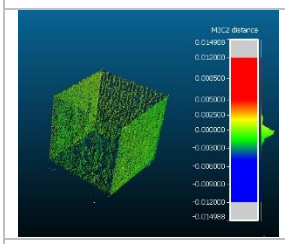
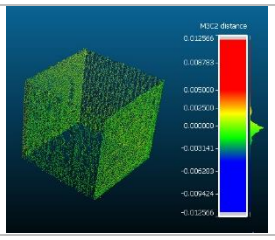
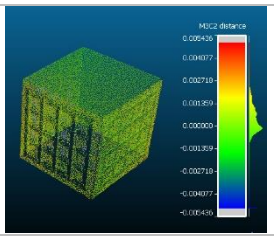
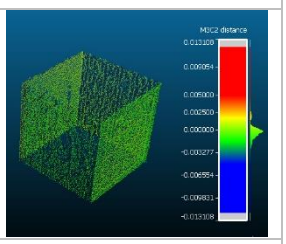
يوضح الشكل التالي نتائج خوارزمية M3C2 المطبقة على سيناريوهات مختلفة بناءً على عدد نقاط الضبط (CPs). يمثل المحور الأفقي عدد نقاط الضبط، ويتراوح من 4 إلى 64، بينما يشير المحور الشاقولي إلى قيمة RMSET (جذر الخطأ المتوسط التربيعي الكلي) عند معامل موثوقية 95% بوحدة الميليمتر، وهو مقياس شائع لدقة البيانات المكانية. تمثل الخطوط الملونة المختلفة تكوينات أو توزيعات مختلفة لنقاط الضبط:

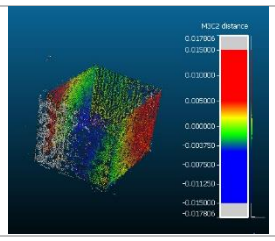
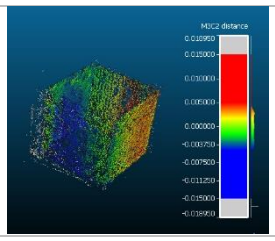
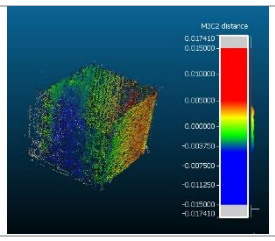
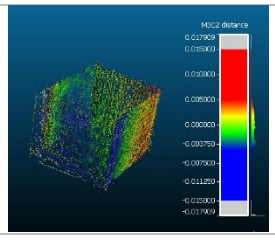
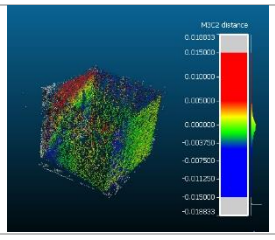
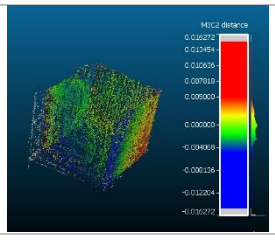
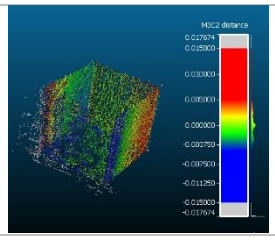
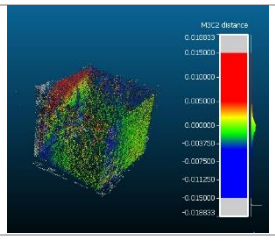
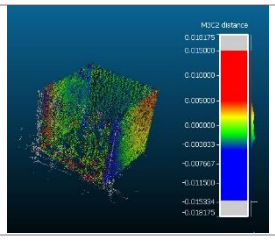


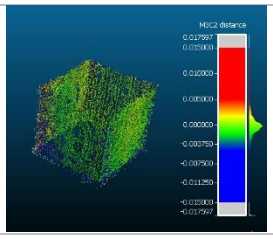
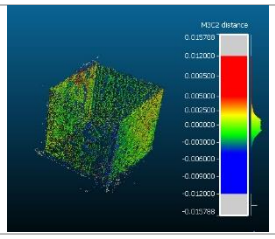
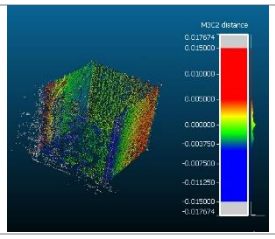
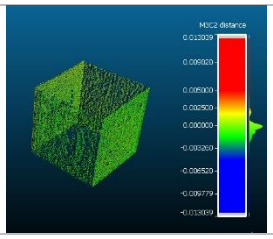
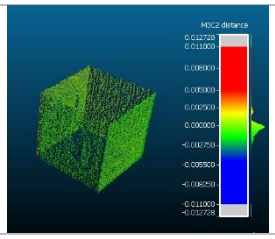
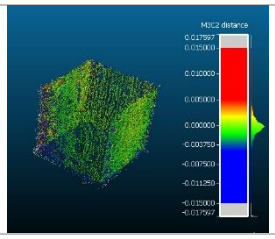
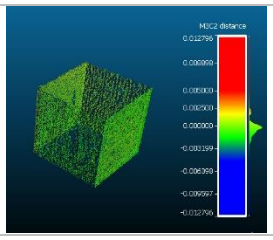
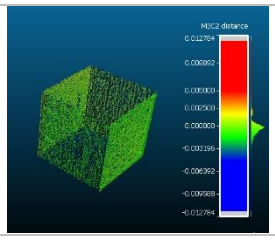
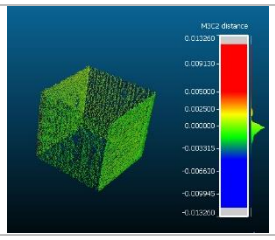
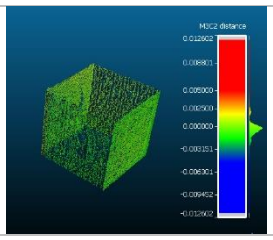
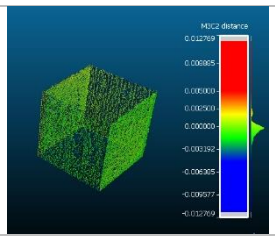
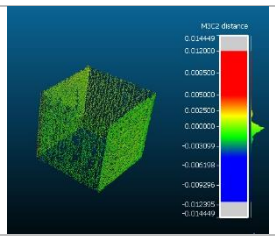
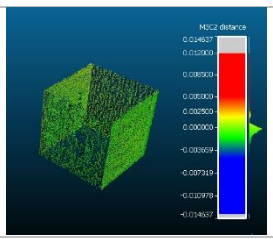
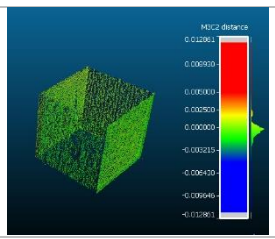
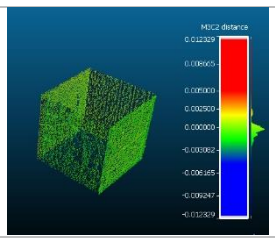
الشكل (16) نتائج تطبيق خوارزمية M3C2 في جميع حالات التجربة عند درجة موثوقية 95%

نوضح في الشكل (18) غمامات الفروقات لعنصر الاختبار والمحسوبة وفق خوارزمية M3C2 لحالات الدراسة المختلفة.

Random	Edge	Corner	Central
			
Random–4 Points	Edge–4 Points	Corner–4 Points	Central–4 Points
			
Random–8 Points	Edge–8 Points	Corner–8 Points	Central–8 Points
			
Random–12 Points	Edge–12 Points	Corner–12 Points	Central–12 Points
			
Random–16 Points	Edge–16 Points	Corner–16 Points	Central–16 Points
			
Random–24 Points	Edge–24 Points	Corner–24 Points	Central–24 Points

			
Random–32 Points	Edge–32 Points	Corner–32 Points	Central–32 Points
			
Random–48 Points	Edge–48 Points	Corner–48 Points	Central–48 Points
			
Random–64 Points	Edge–64 Points	Corner–64 Points	Central–64 Points

Edge–Diagonal	Edge–Central	Stratified
		
Edge–Diagonal 4 Points	Edge–Central 4 Points	Stratified 4 Points
		
Edge–Diagonal 8 Points	Edge–Central 8 Points	Stratified 8 Points
		
Edge–Diagonal 12 Points	Edge–Central 12 Points	Stratified 12 Points

		
Edge–Diagonal 16 Points	Edge–Central 16 Points	Stratified 16 Points
		
Edge–Diagonal 24 Points	Edge–Central 24 Points	Stratified 24 Points
		
Edge–Diagonal 32 Points	Edge–Central 32 Points	Stratified 32 Points
		
Edge–Diagonal 48 Points	Edge–Central 48 Points	Stratified 48 Points
		
Edge–Diagonal 64 Points	Edge–Central 64 Points	Stratified 64 Points

الشكل (18) غمامات الفروقات لعنصر الاختبار والمحسوبة وفق خوارزمية M3C2 لحالات الدراسة المختلفة

الاتجاه العام:

- تظهر معظم التوزعات انخفاضاً عاماً في قيمة RMSET مع زيادة عدد نقاط الضبط ، وهو ما يُتوقع عادةً حيث أن زيادة عدد نقاط الضبط تتيح دقة أفضل في النماذج المكانية.
- بعض الخوارزميات تستقر بعد عدد معين من نقاط الضبط ، مما يشير إلى أن إضافة المزيد من النقاط بعد هذا الحد لا يحسن الدقة بشكل كبير.

لتحديد التوزيع الأمثل لنقاط الضبط (CPs) بناءً على تحليل نتائج خوارزميةM3C2 ، يمكن النظر في عدة معايير تشمل ما يلي:

1. **الدقة الأولية (عدد قليل من نقاط الضبط):**

- أفضل أداء: تبدأ الخوارزمية العشوائية بأقل قيمة RMSET (1.5 mm) عند 4 نقاط ضبط.
- أسوأ أداء: تمتلك خوارزمية الحواف أعلى قيمة RMSET (7.6 mm) عند 4 نقاط ضبط، مما يجعلها أقل ملاءمة للسيناريوهات ذات عدد محدود من نقاط الضبط.

2. **التحسن مع زيادة نقاط الضبط:**

- تحسن سريع: تظهر خوارزمية الحواف أكبر تحسن، حيث تنخفض قيمة RMSET من 7.6 mm عند 4 نقاط ضبط إلى 1.3 mm بحلول 16 نقطة ضبط. يشير ذلك إلى أنه على الرغم من أن أداؤها يبدأ بشكل ضعيف، إلا أنها تستفيد بشكل كبير من زيادة نقاط الضبط.
- تحسن ثابت ولكن تدريجي: تتحسن خوارزميات التوزع المركزية والحواف بشكل ثابت ولكن تدريجي، حيث تتحسن الخوارزمية المركزية من 4.4 إلى 1.5 mm مع زيادة نقاط الضبط من 4 إلى 24.

3. **الاستقرار عند عدد كبير من نقاط الضبط:**

- ثبات عند RMSET منخفض: تستقر معظم الخوارزميات عند حوالي 1.4 إلى1.5 mm بعد 24 نقطة ضبط، مما يشير إلى أن إضافة المزيد من نقاط الضبط بعد هذه النقطة لا يحسن الدقة بشكل كبير.
- سلوك الخوارزمية العشوائية: تظهر الخوارزمية العشوائية، على الرغم من دقتها الأولية، عدم استقرار مع إضافة المزيد من نقاط الضبط، حيث تصل قيمة RMSET إلى ذروتها عند 5.7 mm عند 16 نقطة تحكم قبل أن تستقر. يجعل هذا التباين أقل موثوقية عند أعداد أكبر من نقاط الضبط.

4. **أفضل أداء شامل عبر جميع نقاط الضبط:**

- أفضل أداء شامل: تقدم خوارزمية الحواف–المركزية توازناً جيداً، حيث تبدأ بقيمة RMSET تبلغ 6.2 mm عند 4 نقاط ضبط وتتحسن بشكل ثابت إلى حوالي 1.4 mm، وتستقر عند 24 نقطة ضبط وما بعدها. يجعلها هذا اختياراً موثوقاً عبر مختلف أعداد نقاط الضبط.
- الأفضل لمتطلبات الدقة العالية: تحقق خوارزمية الحواف، بمجرد وصولها إلى 16 نقطة ضبط، واحدة من أقل قيم RMSET (1.3 mm) وتبقى مستقرة. يجعلها ذلك مثالية للسيناريوهات التي تتطلب دقة عالية.

5. **الكفاءة (العدد الأمثل لنقاط الضبط):**

- أقل عدد من نقاط الضبط لتحقيق دقة مقبولة: تشير خوارزمية الحواف، التي تصل إلى RMSET بقيمة 1.3 mm مع 16 نقطة ضبط فقط، إلى أنها الأفضل لتحقيق دقة عالية بأقل عدد من نقاط الضبط.
- نقطة العوائد المتناقصة: تصل معظم الخوارزميات، بما في ذلك المركزية، والطرفية، والحواف–المركزية، إلى نقطة العوائد المتناقصة عند 24 نقطة ضبط، حيث تقدم نقاط الضبط الإضافية تحسناً طفيفاً في الدقة.

الاستنتاجات والتوصيات:

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

- **تأثير عدد نقاط الضبط على دقة النماذج:** أظهرت الدراسة أن زيادة عدد نقاط الضبط تساهم في تحسين دقة النماذج ثلاثية الأبعاد، ولكن هذا التأثير لا يستمر بعد عدد معين من النقاط. عند تجاوز هذا العدد، تصبح الزيادة في عدد النقاط غير فعالة وقد لا تسهم في تحسين الدقة بشكل ملحوظ.
- **أهمية التوزيع المكاني لنقاط الضبط:** يعد توزع نقاط الضبط على الحواف (Edge Distribution) الأكثر كفاءة لتحقيق دقة عالية باستخدام عدد أقل من النقاط حيث وصل الى دقة 1.4 mm عند 16 نقطة ضبط، كما أن توزع الحواف–المركزي يوفر أداءً موثوقاً وثابتاً عبر مختلف أعداد نقاط الضبط،
- **تحسين الدقة مع توزع الحواف–المركزي:** تم تحقيق أفضل دقة عند استخدام توزيع حواف–مركزي حيث توازنت الدقة مع العدد الأمثل من النقاط. وهذا يشير إلى أن هذا النمط يوفر توازناً مثالياً بين عدد النقاط والكفاءة في تحقيق الدقة المطلوبة.

بناءً على التحليل التجريبي نوصي بما يلي:

- **تحديد عدد مناسب من نقاط الضبط:** يجب تجنب الزيادة غير الضرورية في عدد نقاط الضبط بعد الوصول إلى العدد الأمثل، حيث لا يؤدي ذلك إلى تحسن ملحوظ في الدقة. يوصى باستخدام 16 نقطة ضبط كعدد أمثل في أغلب التطبيقات التي تتطلب دقة عالية.
- **اختيار نمط التوزيع بعناية:** يفضل استخدام توزع الحواف في التطبيقات التي تتطلب دقة عالية مع موارد محدودة من النقاط. كما يُنصح باستخدام توزع الحواف–المركزي في السيناريوهات التي تتطلب إعادة بناء هياكل تفصيلية معقدة ودقيقة، حيث يوفر استقراراً أكبر عبر أعداد متزايدة من النقاط، يوفر هذان النمطان أفضل النتائج من حيث الدقة والاستقرار.
- **التقنيات المتقدمة لتحليل الغمامات:** استخدام خوارزمية (Multiscale Model–to–Model Cloud Comparison M3C2) لتقييم دقة الغمامات ثلاثية الأبعاد أظهر أن المقارنة بين النماذج المنتجة من مختلف أنماط توزيع نقاط الضبط يمكن أن تكشف عن الفروقات الدقيقة في الدقة الهندسية.
- **فكرة مقترحة لدراسة بحثية:** دراسة تأثير معايرة آلة التصوير على دقة التثليث الصوري في النماذج ثلاثية الأبعاد ضمن التطبيقات محدودة الموارد)، يُعد ضمان ضبط آلة التصوير بدقة أمراً بالغ الأهمية لضمان توافق نتائج الصور مع النماذج ثلاثية الأبعاد المولدة، خاصة عند العمل في تطبيقات محدودة الموارد. لذلك يُنصح بالتركيز على معايرة آلة التصوير المستخدمة لضمان تحقيق أعلى مستويات الدقة في التثليث الصوري.

References:

[1] T. Hellman, M. Lahti - *Photogrammetric 3D modeling for virtual reality*. 2018. https://www.researchgate.net/publication/327227913 [access: 28.06.2022].

[2] F. Remondino, M.G. Spera, , E. Nocerino, , F. Menna, F. Nex, - *State of the art in high density image matching*. The Photogrammetric Record, vol. 29, pp. 144–166, 2014.

[3] G.J.J. Verhoeven - *Taking computer vision aloft – Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan.* Archaeological Prospection, vol. 18, pp. 67–73, 2011.

[4] J. Torres-SÁNCHEZ, F. LÓPEZ-Granados, I. Borra-Serrano, J. Manuel Peña - *Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital sur- face model accuracy in olive orchards.* Precision Agriculture, vol. 19, no. 1, pp. 115–133, 2018.

[5] E. Oniga, A. Breaban, F. Statescu - *Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images.* Remote Sensing, vol. 2, no. 7, 2018, art. no. 352. https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05165

[6] S. Harwin, A. Lucieer, J. Osborn - *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, pp. 11933–11953, 2015.

[7] E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandler, J.R. Rodríguez-Pérez, C. Ordóñez, *Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used*. Remote Sensing. 2018, 10, 1606. https://doi.org/10.3390/rs10101606

[8] P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega, F. Carvajal- F. Ramírez, A. Mesas-Carrascosa, F. García-Ferrer, J. Pérez-Porras, - *Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points*. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 72, pp.1–10, 2018. doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015

[9] J.J. Yu, D.W. Kim, E.J. Lee, S.W. Son, *Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models*. Drones, 4, 49, 2020. https://doi.org/10.3390/drones4030049

[10] 12 Septembers 2024. < https://www.researchgate.net/figure/The-reconstruction-process-of-a-typical-SFM-method_fig2_341991603>

[11] 12 Septembers 2024. < https://www.researchgate.net/figure/Top-view-of-geometry-of-camera-motion-Two-successive-images-are-captured-by-rotating-a_fig1_3183262>

[12] 12 Septembers 2024. <https://www.kigalidiscount.com/collections/cell-phones-smartphones/products/samsung-galaxy-j7-pro-64gb-dual-sim

[13] Agisoft Metashape. –*Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*, 180p. 2022.

[14] D. Lague, N. Brodu, J. AND Leroux, - *Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ)*, ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, vol 82, pp. 10–26, 2013.