

Proposition of a Methodology to Assess Photo-triangulation and Dens Matching Algorithms Accuracy in Image-based 3D Documentation Systems

Dr. Omar AL KHALIL*

(Received 11 / 9 / 2019. Accepted 20 / 10 / 2019)

□ ABSTRACT □

The application of automated photogrammetry in 3D documentation of cultural heritage has increased in recent years, thanks to the development of optical sensors and improved computational capabilities. The processing chain begins by automatic search for common points between images by applying matching algorithms. The calculation of the exterior orientation parameters of images, is then achieved by photo-triangulation bundle-adjustment based. Finally, image-matching algorithms are applied to generate 3D dense point cloud, which is a key input in generating 3D models of objects.

In this paper, a methodology to assess geometric accuracy of photo-triangulation of image blocks, was discussed. This methodology was applied to the output of some of the most famous automated photogrammetry software. The results shown that the true values of photo-triangulation accuracy range from 3 to 5 times the theoretical accuracy. It is also possible to achieve a true resolution for the dense cloud close to the theoretical resolution, if appropriate correlation coefficients are adopted.

Keywords: Automated photogrammetry, Photo-triangulation, Dens matching, Resolution, Exterior orientation.

* Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

اقتراح منهجية لتقييم التثليث الصوري وخوارزميات الربط الكثيف في نظم التوثيق ثلاثي الأبعاد القائم على الصور

د. عمر الخليل*

(تاريخ الإيداع 11 / 9 / 2019. قُبل للنشر في 20 / 10 / 2019)

□ ملخص □

ازداد تطبيق المساحة التصويرية المؤتمتة في التوثيق ثلاثي الأبعاد للتراث الثقافي خلال الفترة الأخيرة وذلك بفضل تطور المستشعرات البصرية وتحسن القدرات الحاسوبية. تبدأ سلسلة المعالجة بالبحث عن النقاط المشتركة بين الصور بشكل مؤتمت بتطبيق خوارزميات الربط. ثم ينجز حساب معاملات التوجيه الخارجي للصور بتطبيق التثليث الصوري بالتعديل بالحزم. وأخيراً تطبق خوارزميات ربط الصور وذلك لتوليد غمامة النقاط الكثيفة والتي تعتبر مدخلاً أساسياً في توليد النماذج ثلاثية الأبعاد للعناصر.

تم في هذا البحث مناقشة منهجية لتقييم الدقة الهندسية للتثليث الصوري لبلوكات الصور، كما تم عرض أهم خوارزميات الربط الكثيف للصور واقتراح آلية لتقييم دقة تمييز غمامة النقاط ثلاثية الأبعاد المحسوبة من هذه الصور. تم تطبيق هذه المنهجية على مخرجات مجموعة من أشهر برامج المساحة التصويرية الآلية. أثبتت النتائج أن القيم الحقيقية لدقة التثليث تتراوح من 3 إلى 5 أضعاف الدقة النظرية. كما أنه من الممكن بلوغ دقة تمييز حقيقية لغمامة النقاط الكثيفة من فئة دقة التمييز النظرية الخاصة بها وذلك في حال اعتماد معاملات الربط المناسبة.

الكلمات المفتاحية: المساحة التصويرية المؤتمتة، تثليث صوري، ربط كثيف، دقة تمييز، توجيه خارجي.

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

البريد الإلكتروني: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يكتسب توثيق المواقع الأثرية أهمية متزايدة هذه الأيام وخاصةً في حالة المواقع المعرضة للخطر. وهنا سيكون من الضروري القيام بنمذجة مفصلة ثلاثية الأبعاد لهذه المواقع وذلك من أجل تسهيل عمليات التحليل والمعالجة اللاحقة وكذلك إعادة البناء للموقع في حال تعرضه للتخريب. عادةً ما يتم إنجاز هذا التوثيق باستخدام المساحات الليزرية ثلاثية الأبعاد أو باستخدام الأسلوب القائم على الصور Image-based والتي تضم المساحة التصويرية و/أو اقتطاع البنية انطلاقاً من الحركة Structure from Motion (SfM) [1]. لهذا الأسلوب العديد من الميزات أهمها سهولة اكتساب البيانات وانخفاض كلفة الأدوات (آلة تصوير رقمية وحاسب).

فيما يخص اكتساب البيانات الصورية، فإننا نطبق قاعدةً عامةً وهي التقاط صور وفق قواعد مبسطة تغطي مساحات واسعة من العنصر وذلك باستخدام آلة تصوير معايرة. يتم الالتقاط آخذين بعين الاعتبار بعض القيود الهندسية وذلك بهدف الحصول على شبكة مواقع تصوير مناسبة تؤمن الحصول على صور مناسبة للتوثيق ثلاثي الأبعاد الكامل والدقيق [2]. من ناحية أخرى، يتم القيام بقياسات لإحداثيات أو لمسافات على العنصر وذلك من أجل عملية الإرجاع الهندسي Georeferencing. تأخذ هذه القياسات شكل شبكة الاستناد المساحي وكذلك نقاط ضبط موزعة على العنصر. بالنسبة للشبكة فإنها يجب أن تحقق المعايير المتبعة في تصميم الشبكات الجيوديزية التقليدية [3]، أما بالنسبة لنقاط الضبط على جسم العنصر، فالهدف منها هو حساب هندسية النموذج وتقييم دقته الهندسية. وهنا تبين التوصيات الهندسية المتعلقة بعدد ونوع وتوزيع هذه النقاط أن عددها وتوزيعها يجب أن يحقق معايير عدد وتوزيع النقاط المعمول بها في التثليث الجوي Aerotriangulation أو الصوري Phototriangulation (العدد الأدنى المطلوب هو ثلاث نقاط وسطياً في مناطق تتداخل الصور) بحيث تكون موزعة بشكل طولاني موحد ضمن هذه المناطق، وذلك لضمان استقرار حساب بلوك الصور رياضياً.

تبدأ سلسلة المعالجة بالمسح التصويري بالبحث عن النقاط المشتركة بين الصور. حالياً تمت أتمتة هذا النهج وذلك بفضل خوارزميات الربط الآلية القائمة على مواصفات العنصر. يتم بعد ذلك تعديل الحزم Bundle adjustment ضمن بلوكات الصور من أجل تحديد مواقع وتوجيهات آلة التصوير بتطبيق التثليث الجوي أو الصوري، وهذا ما يعرف باسم حساب معاملات التوجيه الخارجي Exterior orientation. وفي هذه المرحلة يمكن القيام بالمعايير الذاتية Auto-calibration آخذين بعين الاعتبار معاملات المعايرة ضمن النموذج الرياضي للتعديل. يمكن بعد ذلك القيام بالتوجيه المطلق Absolute orientation لربط بلوك الصور بنظام إحداثيات العنصر أو قد تكون هذه الخطوة مضمنة ضمن التعديل السابق لبلوك الصور. بعد ذلك، يتم تطبيق خوارزميات ربط الصور وذلك لتوليد غمامة النقاط الكثيفة Dens cloud والتي تعتبر مدخلاً أساسياً للعديد من المنتجات مثل الصورة المصححة عامودياً Orthophoto، النماذج ثلاثية الأبعاد والنموذج الرقمي للارتفاعات (DEM) Digital Elevation model.

تم في هذا البحث مناقشة منهجية متكاملة تساعد على تقييم الدقة الهندسية للتثليث الجوي (أو الصوري) لبلوكات الصور، كما تم عرض أهم خوارزميات الربط الكثيف للصور واقتراح آلية لتقييم دقة غمامة النقاط ثلاثية الأبعاد المحسوبة من هذه الصور. تم تطبيق هذه المفاهيم على نتائج الحسابات التي حصلنا عليها باستخدام ثلاثة من أشهر برامج المساحة التصويرية الآلية وهي: Photoscan Metashape، Pix4D Mapper و 3DF Zephyr. أما المنشأ الأثري الذي تم تطبيق المنهجية المقترحة عليه فيتمثل بجزء من الواجهة الشمالية للمتحف الوطني في مدينة اللاذقية.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في محاولته وضع بعض الأسس النظرية والعملية للحكم على دقة منتجات نظم المساحة التصويرية المؤتمتة، وذلك من ناحية حساب مواقع وتوجيه آلة التصوير (معاملات التوجيه المطلق) بتطبيق التعديل بالحزم، وكذلك من ناحية غمامة النقاط ثلاثية الأبعاد والخوارزميات المطبقة في الحصول عليها. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية:

1. تطوير مجموعة من المفاهيم النظرية والرياضية اللازمة لعملية تقييم الدقة الهندسية لمنتجات المسح التصويري المؤتمت.
2. تطبيق المفاهيم السابقة على مجموعة من أشهر الحلول البرمجية ومقارنة النتائج وتحليلها. هذه المقارنة ستتم في سياق توثيق منشأ أثري متمثل بجزء من الواجهة الشمالية للمتحف الوطني في مدينة اللاذقية.

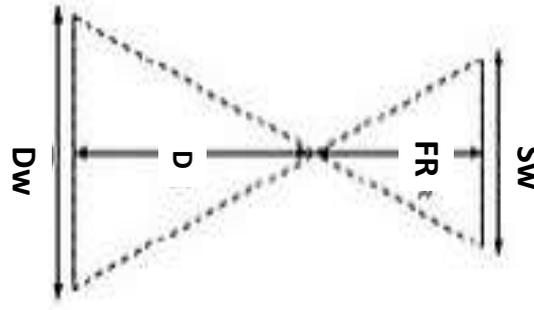
طرائق البحث ومواده:

مازالت عملية تقييم منتجات المسح التصويري المؤتمت غير واضحة وذلك بسبب عدم توفر تحليل موسع للعوامل التي يجب أخذها بعين الاعتبار خلال عملية التقييم. أضف إلى ذلك، العدد الكبير جداً من الحلول البرمجية المتوفرة حالياً للحصول على هذه المنتجات والتي منها البرامج الأكاديمية (مفتوحة المصدر Open source)، التجارية وصولاً إلى البرامج المجانية والتي تحتاج إلى عملية تقييم دقيقة وذلك لمعرفة مدى الثقة بمنتجاتها. لذلك نرى أنه من الضروري التوقف عند توضيح العوامل المؤثرة في التقييم ومن ثم تطبيقها على آلية العمل ونوعية المنتجات التي توفرها أشهر الحلول البرمجية للمسح التصويري المؤتمت في أيامنا هذه.

1- مسافة الاعتيان الأرضية

تعتبر مسافة الاعتيان الأرضية واحدة من المفاهيم المفتاحية في تقييم دقة التمثيل الصوري بطريقة الحزم والذي ينتج عنه معاملات التوجيه الخارجي لآلة التصوير المستخدمة. في الواقع، تعبر مسافة الاعتيان الأرضية Ground Sampling Distance (GSD) (الشكل (1)) عن الطول الأرضي الذي يغطيه البكسل الواحد في الصورة، أو هي المسافة بين مركزي بكسلين مقاسة على الأرض. وكلما كانت قيمة مسافة الاعتيان الأرضية أكبر، فإن هذا يعني وجود كمية أقل من التفاصيل على الصورة. تزداد قيمة مسافة الاعتيان الأرضية بزيادة بعد آلة التصوير عن العنصر المصور، وتتنقص قيمتها بنقصان هذا البعد. كما تتأثر قيمة هذه المسافة بالبعد المحرق لآلة التصوير وكذلك بأبعاد البكسل في الصورة.

في الحالة المثالية، يتم تثبيت قيمة مسافة الاعتيان، ثم نحسب بعد آلة التصوير عن العنصر والذي يحقق هذه المسافة. أما عملياً، فإنه من الصعب التحكم بالبعد عن العنصر وخاصةً في حالة المواقع الأثرية، وبالتالي يكون هذا البعد هو العنصر الأهم في حساب قيمة مسافة الاعتيان. وفي كل الأحوال من الممكن استخدام الارتفاع، حجم وعدد البكسلات، والبعد المحرق لتحديد هذه القيمة.



الشكل (1). مسافة الاعتيان الأرضية.

من الشكل السابق نجد:

$$(1) \quad \frac{D}{F_R} = \frac{D_W}{S_W}$$

$$(2) \quad D = \frac{D_W * F_R}{S_W}$$

حيث: S_W هو العرض الحقيقي للمستشعر (يعطى بالمليمتر)، F_R هو البعد المحرفي الحقيقي (يعطى بالمليمتر)، D بعد آلة التصوير عن العنصر (يعطى بالمتراً) و D_W هو البعد الذي يغطيه عرض الصورة على العنصر (يعطى بالمتراً). يمكن حساب D_W من العلاقة التالية:

$$(3) \quad D_W = \frac{Im_w}{100} * GSD$$

حيث: Im_w هو عرض الصورة مقدراً بالبكسل.

بدمج العلاقتين (2) و (3)، نجد:

$$(4) \quad D = \frac{Im_w * GSD * F_R}{(S_W * 100)}$$

2- التثليث الجوي أو الصوري

التثليث الجوي Aerotriangulation هو المصطلح المستخدم للدلالة على عملية تحديد الإحداثيات الأرضية XYZ لنقاط فردية باستخدام قياسات الإحداثيات الفوتوغرافية لهذه النقاط. وقد يكون التثليث الصوري Phototriangulation هو المصطلح الأكثر عمومية وذلك لأن هذه العملية تطبق أيضاً على الصور الأرضية إضافة إلى تطبيقها على الصور الجوية. يعتبر التثليث باستخدام الحزم Bundle adjustment هو الطريقة الأكثر انتشاراً وهو يقوم على حساب تربط إحداثيات الصورة بإحداثيات الجسم مباشرة، دون المرور بإحداثيات المزدوج التجسيمي. و قد سميت الطريقة بطريقة الحزم بسبب وجود عدد كبير من الأشعة الضوئية التي تمر عبر كل موقع للعدسة مشكلةً بذلك حزمة من الأشعة. ويرتكز مبدأ التعديل على تطبيق ثلاثة انسحابات Z_0, Y_0, X_0 و ثلاثة دورانات κ, ϕ, ω (معاملات التوجيه الخارجي Exterior orientation) على كل حزمة تجسيمية إلى أن تتقاطع الأشعة مع نقاط الربط وتتطابق مع نقاط الضبط. هذا، ويتم تحديد معاملات التوجيه الخارجي لهذه الحزم في آن واحد لكافة صور البلوك. أما المعطيات الأولية هي إحداثيات الصورة لنقاط الربط (الموجودة في أكثر من صورة) ونقاط الضبط، وكذلك الإحداثيات الأرضية لهذه الأخيرة.

يهدف حل مشكلة التوجيه الخارجي يمكن تطبيق عدة أساليب منها:

1. معادلة التسامت Colinearity equation: وهي معادلة لاخطية تصف العلاقة الرياضية بين نقطة من العنصر، مرتسم هذه النقطة على الصورة ومركز الإسقاط لآلة التصوير [4]. يعتبر التثليث الجوي باستخدام الحزم حالةً نموذجية لتطبيق معادلات التسامت [5] معادلة الوقوع في نفس المستوي Coplanarity equation: تعبر هذه المعادلة اللاخطية عن شرط وقوع محطتي النقاط صورتني مزدوج تجسيمي مع أي نقطة من نقاط العنصر و مسقطيها في الصورتين في نفس المستوي. الميزة الاساسية لهذه المعادلة هو عدم ظهور الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لنقطة العنصر فيها، وبالتالي فهي تطبق في تحديد معاملات التوجيه النسبي Relative orientation لصورة بالنسبة لأخرى [5].
2. طريقة التحويل الخطي المباشر (Direct Linear Transformation) DLT: وهي طريقة تعبر عن مشكلة التوجيه الداخلي بشكل خطي مشتق من معادلات التسامت [6]. الميزة القوية لهذه الطريقة هي حل المعادلات دون الحاجة إلى قيم أولية للمجاهيل (معادلات خطية) ولكنها تعاني من عدم الاستقرار في حال تطبيقها على العناصر المستوية.
3. التقويم الفراغي Spatial resection: وهو أسلوب لتحديد معاملات التوجيه الخارجي باستخدام صورة واحدة. وفي هذه الحالة، يمكن تحديد هذه المعاملات بمساعدة ثلاث نقاط ضبط بتطبيق معادلات التسامت [7].
4. مصفوفة الإسقاط Projection matrix: وهي طريقة لحساب معاملات التوجيه الخارجي تم تطويرها في مجال الرؤية بمعونة الحاسب Computer vision. وهذه المصفوفة تصف عملية الإسقاط المركزي للحيز ثلاثي الأبعاد على الصورة ثنائية البعد. يتم في هذه المصفوفة استخدام الإحداثيات المتجانسة homogeneous coordinates عوضاً عن الإحداثيات الديكارتيّة [8].

3- منهجية لتقييم دقة التثليث الصوري

قبل حساب التثليث الصوري (أو الجوي)، يمكننا إجراء بعض الدراسات النظرية التي تسمح لنا بالتقدير المسبق للدقة. يجب أولاً تحديد دقة القياس وبالتالي تحديد حجم البكسل في العنصر Pixel-object أو مسافة الاعتيان الأرضية GSD. يمكن الحصول على هذه القيمة انطلاقاً من المعادلة (4) كعلاقة بين البعد المحرق والمسافة المتوسطة بين آلة التصوير والعنصر:

$$GSD = \frac{D * S_w * 100}{Im_w * F_R} \quad (5)$$

تعطينا أبعاد البكسل في حيز العنصر فكرةً مسبقة عن الدقة المتوقعة، مع العلم أنه في حالة المساحة التصويرية القريبة تتغير هذه القيمة بشكل كبير وذلك لأنها تتبع للمسافة الفاصلة بين آلة التصوير والعنصر. يمكننا أن نضيف أن دقة القياس اليدوي لنقاط الضبط على الصورة يمكن أن تكون أقل من بكسل واحد. في كل الأحوال، يتم التعرض لمسألة دقة القياس اليدوي للنقاط بشكل تجريبي على الغالب. فقد تمت الإشارة في [9] إلى أن العامل الخبير يمكن ان يحقق دقةً تصل حتى 0.13 من حجم البكسل. ومن ناحية ثانية، أعطى كل من KRAUS و WALDHÄUSL [10] في العام 1998 و AFSHARNIA وزملاؤه [11] في العام 2015 تقديراً متسامحاً أكثر تصل قيمته إلى 0.3 من حجم البكسل وهي القيمة المعتمدة أكثر. استناداً إلى ما سبق، يمكننا أن نحدد قيمة الدقة المتوقعة للقياس في حيز العنصر بالعلاقة التالية:

$$\sigma_{xyz} = 0.3 * GSD \quad (6)$$

حيث σ_{xyz} هي الدقة الأفقية والشاقولية للقياس.

تجب الإشارة إلى أنه في [10] يتم التفريق بين الدقة الأفقية σ_{xy} والدقة الشاقولية σ_z حيث يتم تقدير قيمة σ_z كتاباً لارتفاع الطيران مع فرضية أن آلة التصوير بعيدة جداً عن العنصر. إن هذه الفرضية ليست صحيحة في حالة المساحة التصويرية القريبة ولهذا تم دمج قيم هذه الدقات لتصبح σ_{xyz} .

يمكننا أيضاً أن نشير إلى أنه في [10] قد تم إدخال معامل أمان من أجل القياس في حال كون نقاط الضبط المستخدمة هي نقاط طبيعية. هذا المعامل تم تحديده بطرق تجريبية من أجل مشروعات المسح التصوير على نطاق واسع. إن استخدام هذا المعامل في حالة المسح التصويري القريب ليس إذاً في محله. ومع ذلك، وبسبب استخدام نقاط ضبط طبيعية في العديد من مشاريع المسح التصويري القريب يمكننا إدخال معامل أمان تجريبي قيمته تساوي 2 آخذين بعين الاعتبار بعض مصادر الأخطاء في القياس (الضجيج في الصورة مثلاً ومعدل ضغط صيغة الصورة واستقرار المستشعر... الخ):

$$(7) \quad \sigma_{xyz} = 0.3 * GSD * 2$$

تم بعد ذلك في [10] اقتراح بعض العلاقات لحساب دقات التثليث الصوري انطلاقاً من دقة القياس السابقة. ولكننا نشير إلى أن هذه العلاقات وضعت من أجل الصور التشابهية في المساحة التصويرية الجوية التقليدية. وتتبع العلاقات المقترحة في هذا الكتاب لتشكيل نقاط الضبط. وهنا تم اقتراح أربعة سيناريوهات مع نماذجها الرياضية من أجل تقييم دقتها المستوية. هذا، وتتبع الدقة الشاقولية لعدد النماذج بين نقطتي ضبط متتاليتين بالارتفاع. ونلاحظ أنه من أجل الحفاظ على الدقة المستوية فإن نقاط الضبط المحيطة هي فقط المرتبطة بالموضوع، كما أن إضافة نقاط ضبط إلى داخل بلوك الصور لا يؤمن رفعاً ذا شأن للدقة.

إن المعادلات المقترحة في [10] لا تطبق إلا إذا كان مقياس الصور 23 cm x 23 cm مع تداخل نسبته 60% تقريباً مع رقمنة المنطقة الواقعة بين النقطتين الرئيسيتين لصورتين المزوج فقط. أما في معظم حالات المساحة التصويرية القريبة فإن هذه الشروط غير متوفرة، وبالتالي فإننا سنعمد المعادلة (7) لتقدير الدقة النظرية للتثليث الجوي.

4- خوارزميات ربط الصور

تحوي معظم برامج إعادة البناء ثلاثي الأبعاد القائمة على الصور على خوارزمية خاصة بها من أجل توليد الغمامة الكثيفة ثلاثية الأبعاد من النقاط Dense point cloud [12]. ونجد في [13] محاولة لتصنيف الأساليب المختلفة المتوفرة من أجل إنجاز الربط الكثيف Dense matching. يقوم التصنيف الأساسي على مقارنة ربط السمات (مقارنة الواصفات) مع ربط درجات قيم الرمادي Grayscale ضمن نافذة بحث. وبمجرد الانتهاء من المطابقة، يتم القيام بحساب رياضي بسيط بهدف حساب الإحداثيات في حيز العنصر. من ناحية أخرى، يسمى ربط السمات بالربط القائم على السمة (Feature-Based Matching (FBM) أما التصنيف الآخر فيسمى بالتصنيف القائم على المنطقة (Area-Based Matching (ABM) [12].

الخوارزميات التي تتبع التصنيف ABM فعالة جداً مع إمكانية الوصول إلى دقة ربط مساوية لـ 1/50 من البكسل. ومع ذلك، تتطلب الـ ABM عناصر ذات نسجة وكذلك قيماً تقريبية. ومن ناحية أخرى، تبعية الـ FBM للنسجة أقل على الرغم من أن غمامة النقاط الناتجة غالباً ما تكون غير كثيفة بما يكفي. وكمثال على خوارزميات FBM نذكر الـ Scale Invariant Feature Transform (SIFT) أو تحويل سمات الصورة غير المرتبط بمقياس معين [14] و الـ Speeded Up Robust Features (SURF) أو تسريع السمات المتينة [15] وكاشفات هاريس Harris detectors [16] وغيرها.

غالباً ما يتم استخدام الـ FBM في المقام الأول من أجل توليد غمامة نقاط مبعثرة Sparse point cloud [17]. هذه الغمامة تستخدم لاحقاً كقيم أولية في مرحلة الربط الكثيف التي تستخدم الـ ABM. وفيما يتعلق بالـ ABM، فإنه يتوفر نوعان فرعيان يتبعان للحيز الذي تتم فيه عملية المطابقة. يستخدم الأول المستقيمات القطبية Epipolar lines وبالتالي، ينجز الربط في حيز الصورة. في [17] نجد أن الباحث قد قسم هذا الأسلوب إلى طرائق محلية وعامة. في الطريقة العامة (القائمة على استخدام نافذة بحث) يتم حساب التفاوت لكل بكسل. ينطوي استخدام النافذة على تنعيم حدود العناصر [18]. ومن ناحية أخرى، تحسب الطريقة العامة تقليل الطاقة على كامل الصورة مع تنعيم واضح. هذا، وقد تم تطوير طريقة أخرى تسمى المطابقة شبه العامة (SGM) Semi-Global Matching في [19] والتي يتم فيها حساب تقليل الطاقة على طول المستقيم القطبي، وكذلك في الاتجاهات الأخرى حول البيكسل. يقوم النوع الفرعي الثاني للـ ABM بإجراء الربط ضمن حيز العنصر. وفي هذا الأسلوب، تكون سحابة النقطة المبعثرة ضرورية كقيم تقريبية في عملية الربط التي يمكن الحصول عليها من الربط الـ FBM. عند توفر هذه الغمامة النقطية، تقوم الخوارزمية بتصنيف الصور وفقاً لمواقعها بالنسبة للعنصر المراد إعادة بنائه. بعد ذلك، يتم إجراء الربط الكثيف على رقعة حول نقطة ثلاثية الأبعاد من غمامة النقاط المبعثرة التي تراها مجموعة معينة من الصور. يتم بعد ذلك توسيع هذه الرقعة بشكل تكراري باتجاه البكسلات المجاورة في حيز الصورة. يستخدم قيد رؤية لترشيح نتيجة هذه المطابقة [20].

5- منهجية تقييم دقة غمامة النقاط

في إطار تقدير الدقة النظرية لغمامة النقاط الكثيفة يجب أولاً معرفة العوامل التي تلعب دوراً في عملية الربط الكثيف للنقاط إذا كان الأمر يتعلق بحساب نظري لدقة تمييز قيمة الربط الكثيفة. بكل تأكيد يملك كل برنامج معاملاته الخاصة والتي يمكن ضبطها كتابع للخوارزمية المعتمدة. بعض البرامج، وخاصة التجارية منها، لا تقدم إلا أساليب ربط معرفة مسبقاً. ولكن سنحاول هنا تجميع بعض المعاملات المشتركة والمتوفرة في العديد من الخوارزميات.

1- المستوى الهرمي للصورة الداخلة (NP): وهو يخص مستوى الاعتيان الفرعي للصورة المستخدمة في الربط. من المعروف أن الربط الكثيف هي عملية تتطلب إمكانيات حسابية كبيرة. ومعظم البرمجيات المتوفرة تقدم العديد من المستويات الهرمية للصور المدخلة وذلك من أجل تحقيق توافق بين النوعية وزمن الحساب. يعتبر المستوى الهرمي هذا تقسيماً فرعياً على اثنين من أجل كل مستوي وقد يكون على واحد (وهذا يعني دقة التمييز الكاملة) وصولاً إلى 0.03125 (وهذا يعني دقة تمييز مساوية لـ $\frac{1}{32}$ من دقة التمييز الاصلية)

2- نسبة الاعتيان الفرعي (Ts): في نهاية عملية الربط الكثيف نحصل على غمامة نقاط ذات كثافة عالية في معظم الأحيان. بعض البرمجيات تعطي إمكانية تخفيض كثافة غمامة النقاط الناتجة وذلك بتحديد عدد النقاط المطلوب توليدها. تحدد نسبة الاعتيان الفرعي خطوة الربط، فمثلاً سيقوم المعامل 4 بالبحث عن نقطة كل 4 بكسلات من الصورة المدخلة. فنلاحظ أن الصورة المدخلة هي نفسها تابع لـ NP وبالتالي يتم تحديد الخطوة النهائية للربط (P) معطاة بالبيكسل) باستخدام العلاقة التالية:

$$P = \frac{T_s}{N_p} \quad (8)$$

تتراوح قيمة الاعتيان الفرعي من 1 (لا يوجد اعتيان فرعي) وصولاً إلى 16 وربما أكثر.

3- الترشيح والمعالجة اللاحقة: تتم عملية الربط بشكل تكراري في كل الخوارزميات. وفي الأسلوب الذي يبحث ويستخدم المزدوجات التجسيمية ضمن مجموعة البيانات (Photoscan, Pix4D, SURE, Photomodeler) يتم توليد غمامة من أجل كل مزدوج وتتم عملية الترشيح بعد أن يتم توليد غمامة كل المزدوجات الممكنة وذلك باستخدام القيود القطبية غالباً. في الاسلوب الذي يستخدم غالباً العلاقة بين الصور الأساسية والصور الفرعية (MicMac) تتم عملية الترشيح قبل الربط وذلك بالبحث عن أفضل تزاوج بين الصورة الاساسية والصورة الفرعية. وأخيراً يتم الترشيح في الأسلوب القائم على العنصر (PMVS) حسب قيود الرؤية،

4- معامل الارتباط: وهو قيمة تستخدم كحد لموثوقية النقطة المربوطة. وعندما تكون قيمة هذا المعامل يتم توليد عدد أكبر من النقاط وكذلك فإن اعتماد قيمة مرتفعة جداً لهذا العامل تولد ضجيجاً أكبر. ومع قيمة أصغر يتم ترشيح النتائج بطريقة موثوقة أكثر. وبالتالي يتم توليد عدد أقل من النقاط في الغمامة الناتجة. في العديد من البرامج التجارية مثل (Photoscan, Pix4D) تحدد قيمة مسبقاً لمعامل الارتباط ولا يمكن تغييرها. هذا النوع من البرامج يستخدم ترشيحاً أو استكمالاً لاحقاً بهدف جعل النتيجة مقبولة أكثر من ناحية الكثافة. وعلى العكس، ففي MicMac و Photomodeler يمكن تغيير قيمة هذا المعامل وهذا ما يعطي المستخدم القدرة على التحكم في النتائج المرجوة. ولكن وحسب الحالة قد يكون من الصعب تحديد قيمة معامل الارتباط المناسب. يعطينا المعامل P فكرة مسبقاً عن كثافة غمامة النقاط الناتجة. وبهدف ربط هذه القيمة مع نظام احداثيات العنصر يمكن ادخال الـ GSD في المعادلة (7). في هذه الحالة سنحصل على قيمة كثافة نظرية (R_{theo}) لنقاط الغمامة الكثيفة الناتجة.

$$(8) \quad R_{theo} = P * GSD = \frac{T_S}{N_p} * GSD$$

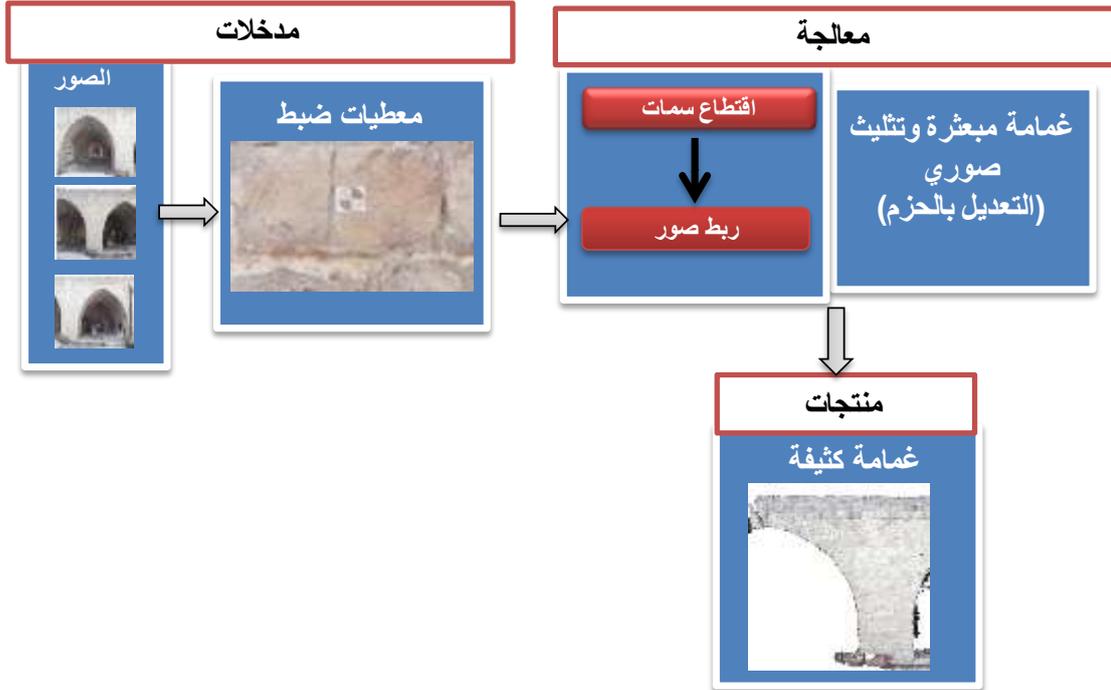
هذه القيمة لدقة التمييز تشبه مفهوم دقة التمييز في المسح الليزري. وهي قيمة تتعلق بالتباعد بين نقطتين في غمامة النقاط. وبالتالي يمكن استخدام هذه الدقة التمييزية كقيمة للتقدير النظري لدقة الربط الكثيف كما تم اقتراحه في [12] و [13].

6- الحلول البرمجية المستخدمة في البحث

البرامج التي تم استخدامها في هذا البحث هي:

- 1- البرنامج Pix4D Mapper: وهو برنامج تم تطويره في مدرسة البوليتكنيك الفيدرالية في لوزان المتخصصة في معالجة الصور. ولكونه برنامجاً تجارياً، فإن الخوارزمية التي يستند عليها هذا البرنامج ليست متاحة. ولكن البرنامج يوفر لنا تقريراً كاملاً في نهاية المعالجة وهو ما يسمح لنا بالتحقق من النتائج [21].
- 2- البرنامج Agisoft PhotoScan: وهو برنامج روسي للنمذجة ثلاثية الأبعاد يستخدم أحدث تقنيات البناء ثلاثي الأبعاد من الصور المتعددة Multi-view المطورة في مجال الرؤية بمعونة الحاسب. كما يمكن من توجيه الصور الملتقطة من أية مواقع مع مراعاة تحقيقها لشرط وقوع أية نقطة من نقاط العنصر على صورتين على الأقل [22].
- 3- البرنامج 3DF Zephyr Aerial: وهو برنامج إيطالي يوفر تدفق عمل كامل للمسح التصويري ويضم أدوات من أجل المعالجة اللاحقة، القياسات، النمذجة ثلاثية الأبعاد انطلاقاً من الصور الثابتة أو تسجيلات الفيديو بشكل آلي [23].

تملك هذه البرامج على اختلافها نفس تدفق العمل تقريباً وهو موضح في الشكل (2):



الشكل (2). تدفق العمل في برامج المسح التصويري المؤتمت.

7- المنشأ المدروس واقتطاع البيانات

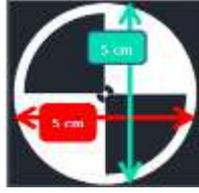
المنشأ المدروس هو جزء من الواجهة الشمالية للمتحف الوطني في مدينة اللاذقية وهو من أهم المنشآت الأثرية في المدينة، وهو معروف أيضاً باسم خان الدخان. يحده جنوباً شارع القدس وغرباً شارع الأندلس وشمالاً شارع عدنان المالكي وقد تم تسجيله كبناء أثري، يعود تاريخ البناء إلى القرن الثامن عشر. آلة التصوير التي استخدمناها في الحصول على الصور هي Nikon Coolpix P100 والتي تتمتع بدقة تمييز عظمى هي 10.3 megapixel. نبين في الجدول (1) مواصفات آلة التصوير:

الجدول (1). مواصفات آلة التصوير المستخدمة في اقتطاع الصور.

Nikon Coolpix P100	
6.123	عرض الصورة بالمليمتر Sw
4.6	البعد المحرق بالمليمتر FR
3648	عرض الصورة بالبكسل Im_w
1.6787	بعد البكسل الواحد بالمكرون w

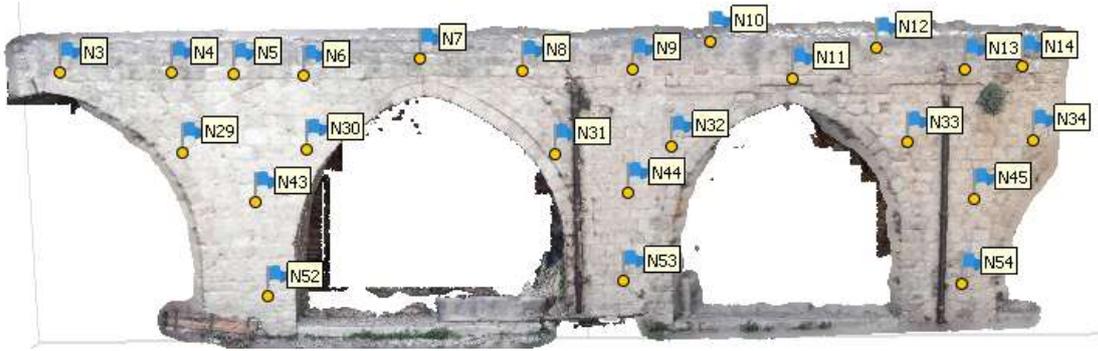
قبل التقاط الصور، تم تحضير معطيات الضبط Control Data والتي لها شكل نقاط أساس مساحي ونقاط ضبط موزعة على مختلف أقسام الواجهة. هذه النقاط ضرورية لتوجيه الصور (حساب مواقع وتوجيهات الصور)، وقد تم الحصول على إحداثياتها (الأفقية والشاقولية) بالطرق الجيوديزية التقليدية. بلغ الخطأ متوسط التربيع على واحدة الوزن في تعديل شبكة الأساس المساحي المحلية 0.0011 m. أما فيما يتعلق بنقاط الضبط على الواجهة، فقد قمنا باستخدام

نقاط ضبط صناعية حيث راعينا عند اختيار شكل وإبعاد هذه النقاط وضوحها في الصور وعدم تغطيتها لأجزاء كبيرة من الواجهة وأن تحقق شرط رؤية كل واحدة منها من نقطتين من نقاط شبكة الاستناد على الأقل. بعد عدة تجارب قررنا اختيار أبعاد النقطة بحيث تكون (5 cm x 5 cm) كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (1). شكل نقطة الضبط الاصطناعية المستخدمة وأبعادها.

تم قياس 24 نقطة ضبط على الواجهة موزعة بشكل منتظم (الشكل 4). إن توفر هذا العدد الكبير من نقاط الضبط يمكننا لاحقاً من استخدامها كنقاط اختبار للحكم على نوعية التوجيه التثليث الصوري لبلوك الصور.



الشكل (4). توزيع نقاط الضبط على العنصر المدروس.

بما أنه لم تتوفر لدينا في الموقع كافة الشروط اللازمة لتحديد إحداثيات نقاط الضبط هذه بالتقاطع الفراغي (اعتبارها جزء من الشبكة الأساسية) فقد تم التعامل مع نقاط الضبط الموزعة على الواجهة كما يتم التعامل مع نقاط الرفع التفصيلي أي أننا حسبنا إحداثياتها بالطريقة المباشرة (زاوية ومسافة وفرق ارتفاع). وبما أنه يمكن رؤية كل من هذه النقاط من نقطتي أساس على الأقل، فقد تم اعتماد القيم المتوسطة لهذه الاحداثيات خلال عملية الرصد، استخدمنا جهاز المحطة المتكاملة من النوع Lieca TS09 حيث استفدنا من إمكانية قياس المسافات الليزري للنقاط، والتي تعتبر ضرورية في مثل هذه الأعمال. يوضح الجدول (2) إحداثيات بعض نقاط الضبط.

جدول (2). الإحداثيات النهائية ثلاثية الأبعاد لبعض نقاط الضبط الموجودة على الواجهة الشمالية.

النقطة	X(m)	Y(m)	Z(m)
N1	148.012	99.093	14.953
N2	146.094	98.965	14.830
N3	143.453	98.761	14.893
N4	141.518	98.620	14.863
N5	140.415	98.539	14.833

تعد مرحلة التصوير من المراحل الأكثر أهمية في عملية النمذجة، وذلك لأن الصور تعد أساساً لاقتطاع بيانات العنصر المصور، وللحصول على أفضل نتيجة قمنا بتطبيق مجموعة التوصيات المقترحة الخاصة بالنقاط الصور المقترحة في [3]. تم التقاط 8 صور لتغطية جزء من الواجهة (الشكل (5)) وتراوح التداخل بينها من 70% إلى 80%.



الشكل (5). الصور الملتقطة للعنصر المدروس.

النتائج والمناقشة:

1- الدقة النظرية لتثليث البلوك

سنقوم أولاً بتطبيق مفهوم الدقة الذي طورناه سابقاً لحساب الدقة النظرية المتوقعة للتثليث الجوي لبلوك الصور المقطع سابقاً وذلك بغض النظر عن البرنامج المستخدم في المعالجة. وللقيام بذلك، نقوم بحساب مسافة الاعتیان الأرضية بتطبيق المعادلة (5) وباستخدام البيانات الموجودة في الجدول (1)، مع العلم أن المسافة المتوسطة بين آلة التصوير والواجهة تساوي $D = 5.88 \text{ m}$ فنجد:

$$GSD = \frac{5.88 * 6.123 * 100}{3648 * 4.6} = 0.21 \text{ cm / pixel}$$

وبتطبيق المعادلة (7)، ستكون الدقة النظرية المتوقعة للتثليث الجوي هي:

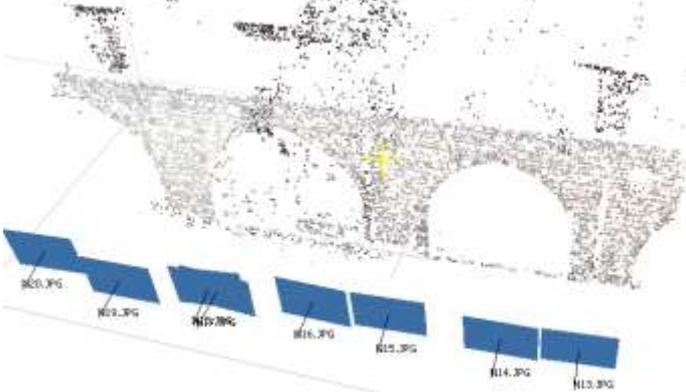
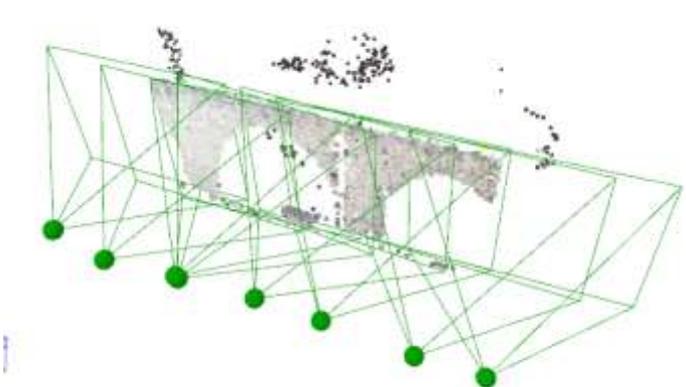
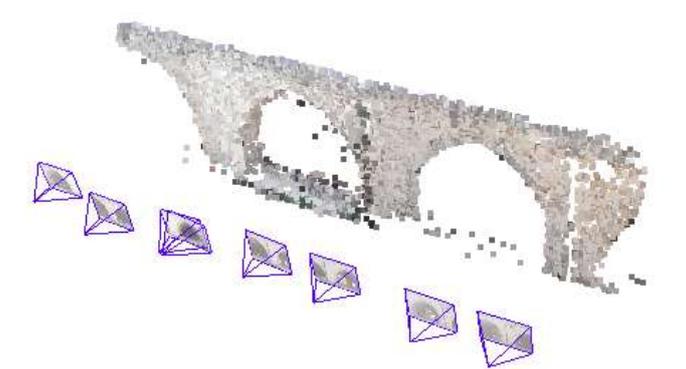
$$\sigma_{xyz} = 0.3 * 0.21 * 2 = 0.126 \text{ cm} = 1.26 \text{ mm}$$

2- الدقة الحقيقية لتثليث البلوك

سنناقش هنا الدقة الحقيقية لتثليث البلوك والنتيجة عن حساب هذا البلوك بمختلف البرمجيات المستخدمة في هذا البحث. باستخدام نفس نقاط الضبط وقياسها من قبل نفس المستخدم، وباعتماد نفس مستويات المعالجة (المستوى العالي الذي يستخدم نصف دقة تمييز الصور الأصلية)، تم تطبيق البرامج المشار إليها سابقاً وهي: Photoscan Metashape, Pix4D Mapper, 3DF Zephyr Aerial في حساب التثليث الصوري لبلوك الصور السابق وذلك بطريقة التعديل بالحزم فحصلنا على النتائج الموضحة في الجدول (3) كما حصلنا على غمامات النقاط المبعثرة ومواقع آلة التصوير في جملة إحداثيات العنصر (الشكل (6)).

جدول (3). الدقة الهندسية الحقيقية للتثليث الصوري المنفذ بتطبيق البرامج المستخدمة في بحثنا.

σ_{xyz} (mm)	σ_z (mm)	σ_y (mm)	σ_x (mm)	البرنامج
3.85	2.40	1.61	2.50	Metashape
4.00	1.86	3.31	1.34	Pix4D
7.6	3.86	4	4.6	Zephyr

	<p>البرنامج Metashape</p> <ul style="list-style-type: none"> - مستوى المعالجة: مرتفع - عدد نقاط الغمامة المبعثرة: 12814 نقطة.
	<p>البرنامج Pix4D</p> <ul style="list-style-type: none"> - مستوى المعالجة: مرتفع - عدد نقاط الغمامة المبعثرة: 12873 نقطة.
	<p>البرنامج Zephyr</p> <ul style="list-style-type: none"> - مستوى المعالجة: مرتفع - عدد نقاط الغمامة المبعثرة: 8387 نقطة.

الشكل (6). المواقع المحسوبة لآلة التصوير نتيجة التثليث الصوري ونقاط الغمامات المبعثرة.

نلاحظ من الجدول (3) والشكل (6):

- 1- كل الخوارزميات (البرامج) نجحت في توجيه بلوك الصور.
- 2- أفضل دقة تم الحصول عليها هي الموافقة لخوارزمية البرنامج Photoscan Metashape وهذا عائد إلى توفر أدوات تساعد المستخدم على قياس مواقع نقاط الضبط بدقة عالية (المستقييمات القطبية) مما يقلل خطأ القياس من قبل المستخدم.
- 3- بالرجوع إلى القيمة النظرية لدقة التثليث المحسوبة سابقاً (1.26 mm) والموافقة للمسافة $D = 5.88 \text{ m}$ بين آلة التصوير والعنصر، نجد أن أيّاً من الخوارزميات (البرامج) لم يستطع تحقيقها. ففي حالة البرنامج Photoscan Metashape و Pix4D نجد أن الدقة الحقيقية للتثليث الصوري (3.58 mm و 4.00 mm) تساوي تقريباً 3 أضعاف الدقة النظرية، في حين تساوي أكثر من خمسة أضعاف في حالة البرنامج 3DF Zephyr (7.00 mm). لا تعتبر هذه الفروقات كبيرةً وذلك إذا عرفنا أن حساب الدقة النظرية للتثليث الصوري لم يأخذ بعين الاعتبار خطأ قياس النقاط الذي يتسبب به المستخدم، إضافةً إلى عدم معايرة آلة التصوير المستخدمة وإدخال معاملات معايرتها في عملية الحساب. من ناحية أخرى، يمكننا تفسير جزء من هذه الفروقات بوجود نوع من الضجيج في الصورة بسبب دقة تمييزها المنخفضة (10.3 megapixel)، تزيغات العدسة وشروط الإضاءة وهو ما أدى إلى عدم وضوح نقاط الضبط في بعض المناطق في الصور مما أثر على دقة قياسها.
- 4- أعداد نقاط الغمامات المبعثرة في حالة البرنامج Photoscan Metashape و Pix4D متقاربة كثيراً ولكنها تختلف في حالة البرنامج 3DF Zephyr. إن هذا يؤكد على أن خوارزمية التثليث المستخدمة في البرنامج Photoscan Metashape و Pix4D هي نفسها. أما بالنسبة للبرنامج 3DF Zephyr فهي خوارزمية أقل فعالية. إن هذا يفسر التقارب بين دقتي التثليث الصوري في حالة البرنامجين الأولين وأن هاتين الدقتين أفضل من دقة التثليث في البرنامج الثالث. في الواقع، كلما زاد عدد نقاط الغمامة المبعثرة زاد عدد المعادلات في التعديل بطريقة الحزم وازدادت دقة حساب المجاهيل فيها.

3- الدقة النظرية لغمامة النقاط الكثيفة

فيما يخص معاملات تكثيف النقاط المعتمدة في خوارزميات البرامج المستخدمة في هذا البحث ودقة تمييز الغمامات الكثيفة الناتجة، فهي موضحة في الجدول (4). نشير إلى أن دقة التمييز (الكثافة) الخاصة بغمامة النقاط الكثيفة يتم حسابها باستخدام المعادلة (8) مع اعتماد مسافة الاعتیان الأرضية المحسوبة سابقاً والمساوية لـ 0.21 cm/pixel . وبالنسبة لنسب الاعتیان الفرعي T_s في البرنامجين Metashape و Zephyr والتي لا يصحّ عنها البرنامجان، فسنعبر أنها مساوية لـ 2 وهي قيمة معتمدة افتراضياً في معظم برمجيات المسح التصويري المؤتمت وذلك عند مستوى المعالجة من النوع "عالي".

بالنسبة لنتائج الخوارزميات الثلاثة المتوفرة في البرامج المستخدمة للربط الكثيف للصور، فهي موضحة في الشكل (7) مع أعداد النقاط المولدة في كل غمامة.

جدول (4). معاملات التكتيف المعتمدة عند تطبيق البرامج المستخدمة في بحثنا.

Zephyr	Pix4D	Metashape	
تفاصيل عالية High details	نصف دقة التمييز Half- resolution	عالي High	مستوى المعالجة المسبق
50%	50%	50%	المستوى الهرمي للصورة الداخلة Np
مجهولة	2	مجهولة	نسبة الاعتيان الفرعي T_s
0.84 cm	0.84 cm	0.84 cm	الكثافة النظرية (دقة تمييز الغمامة الكثيفة) R_{theo}
ترشيح باستخدام شرط الوقوع في نفس المستوي (3 أشعة في النقطة)	ترشيح باستخدام شرط الوقوع في نفس المستوي (3 أشعة في النقطة)	ترشيح باستخدام شرط الوقوع في نفس المستوي	الترشيح اللاحق للغمامة الكثيفة

	البرنامج Metashape عدد نقاط الغمامة الكثيفة: 3986687 نقطة.
	البرنامج Pix4D عدد نقاط الغمامة الكثيفة: 2400521 نقطة.
	البرنامج Zephyr عدد نقاط الغمامة الكثيفة: 1066751 نقطة.

الشكل (7). نتائج الخوارزميات الثلاثة المتوفرة في البرامج المستخدمة للربط الكثيف للصور.

نلاحظ من الشكل (7) أن عدد النقاط التي تم الحصول عليها بخوارزمية تكثيف البرنامج Photoscan Metashape هو الأكبر مقارنةً بخوارزميات البرنامجين الباقيين، كما أن هذه الغمامة تمثل المشهد المصور بشكل أفضل مقارنةً بالمشاهد الناتجة عن البرنامجين الباقيين. إن هذا لا يمكن تفسيره إلا بواقع أن خوارزميات التكثيف المتوفرة في البرنامجين Pix4D و Zephyr اعتبرت العديد من النقاط المستقرّة من الصور على أنها أخطاء وبالتالي حذفها، وهذا ناتج أساساً عن تأثير دقة التمييز المنخفضة للصور الأصلية.

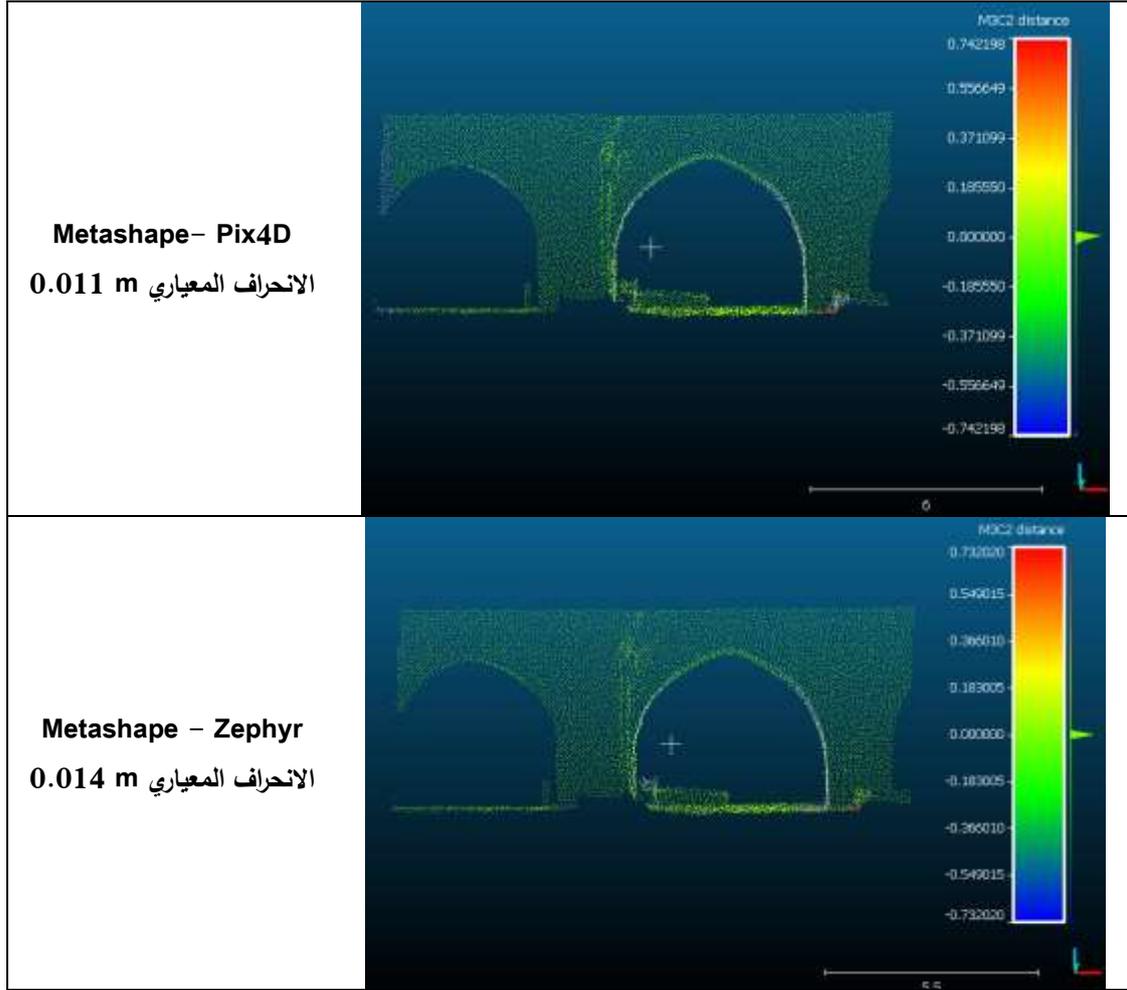
4- الدقة الحقيقية لغمامة النقاط الكثيفة

بالعودة إلى الجدول (4) نجد أن دقة التمييز النظرية للغمامات الكثيفة هي 0.84 cm. وللتأكد من دقة هذه القيمة لابد من المقارنة مع قيمة مرجعية معروفة. في الواقع كان من الممكن اتباع المنهجية المطبقة في [24] في عملية التقييم. تتلخص هذه المنهجية فيما يلي:

1. القيام بمسح ليزري للعنصر المدروس مع ضمان أن تكون دقة إرجاع المسوحات إلى نفس نظام إحداثيات المسح التصويري هي من فئة دقة التثليث الصوري للحل بالمسح التصويري.
2. تحويل غمامة المسح الليزري إلى سطح واعتباره سطحاً مرجعياً لغمامات المسح التصويري.
3. القيام بمقارنة غمامات المسح التصويري مع السطح المرجعي السابق و دراسة الفروق وذلك للتمكن من تقييم دقة تمييز هذه الغمامات.

ولكن وللأسف لا يتوفر لدينا إمكانية استخدام مساح ليزري. ولذلك قررنا القيام بمقارنة نسبية على اعتبار أن غمامة النقاط الكثيفة الناتجة عن خوارزمية البرنامج Photoscan Metashape هي المرجعية بالنسبة للغمامتين الباقيتين. في الواقع، يمكننا اعتماد هذه المنهجية على اعتبار أن هذه الغمامة هي الأكثر كثافةً واكتمالاً ولكن يجب القيام بتحرير هذه الغمامة مسبقاً بحيث تغطي نفس الامتداد الجغرافي الذي تغطيه الغمامتان الباقيتان. تمت عملية التحرير هذه داخل بيئة البرنامج Photoscan Metashape.

لمقارنة الغمامات قمنا باستخدام خوارزمية M3C2 الموجودة في البرنامج CloudCompare والتي تسمح بحساب المسافات بإشاراتها بين غمامتين بشكل مباشر وهذه الخوارزمية تولّد غمامة جديدة تحوي الفروقات بين الغمامتين الأصليتين [25]. تعتبر هذه الخوارزمية مناسبة بشكل خاص لمقارنة الغمامات الناتجة عن المسح التصويري الآلي [26]. يمكن التعبير عن توزيع الفروقات بين الغمامات باستخدام توزيع غاوس Gaussian distribution (التوزيع الطبيعي) وتحليل النتائج باستخدام مفهوم الانحراف المعياري Standard deviation. نبين في الشكلين (8) و (9) غمامات الفروق وقيم الانحرافات المعيارية لنتائج مقارنة غمامة البرنامج Pix4D والبرنامج Zephyr مع غمامة البرنامج Metashape التي اعتبرت مرجعية. نلاحظ من النتائج أن الانحرافات المعيارية في كلا الحالتين هي من 1.1 cm و 1.4 cm على الترتيب وهي قيم قريبة من قيمة دقة التمييز النظرية المحسوبة سابقاً والمساوية للقيمة 0.84 cm.



الشكل (8). نتائج حساب القروف بين غمامات النقاط بطريقة M3C2.

الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المقدمة مسبقاً، نستنتج مايلي:

1. فيما يخص التلثيث الصوري، وجدنا أن القيم الحقيقية للدقة تتراوح في المثال المطبق بين 3 إلى 5 أضعاف الدقة النظرية.
2. فيما يخص خوارزميات ربط الصور وتوليد الغمامات الكثيفة الموجودة في معظم برمجيات المسح التصويري الآلي، وجدنا أن اعتماد نصف دقة تمييز الصور الأصلية في المعالجة يعطي نتائج جيدة. وقد أكدت دراسات أخرى أن اعتماد قيمة أكبر لهذه الدقة سينتج غمامة أكثر كثافة لكنها تحوي كميات أكبر من الضجيج [24].
3. وجدنا أنه في حال اعتماد معاملات الربط التوافقية (راجع الجدول (4)) المؤثرة في خوارزميات الربط وتوليد الغمامة الكثيفة من النقاط، فإنه من الممكن بلوغ دقة تمييز حقيقية للغمامة من فئة دقة التمييز النظرية. في النهاية نوصي بالنمذجة الرياضية لعوامل أخرى تؤثر على الدقة النظرية للتلثيث الجوي. من هذه العوامل نذكر الضجيج الموجود في الصور وكذلك تأثيرات معايرة آلة التصوير. كما نوصي باعتماد غمامة مرجعية مقاسة بتقنية المسح الليزري من أجل تقييم دقة تمييز غمامات النقاط الكثيفة المتولدة ببرمجيات المسح التصويري بشكل أدق.

المراجع:

- [1] REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, T.P., and TROISI, S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation—a critical overview. *Progress in Cultural Heritage Preservation* 7616 LNCS, 40–54.
- [2] WALDHAUSL, P., OGLEBY C. (1994). 3X3 Rules for simple photogrammetric documentation of architecture. In: J. G. Fryer (Editor), *Int. archives of Photogrammetry and remote sensing*, Vol XXX, Part5. 1994.
- [3] دوه جي، محمد، الخليل، عمر، يحيى، منير. (2017). التكامل بين تقنيتي المساحة التصويرية القريبة الرؤية بمعونة الحاسب في التوثيق ثلاثي الأبعاد للتراث المعماري. أطروحة ماجستير، قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين.
- [4] HE, F. and HABIB, A., 2015. Target-based and feature-based calibration of low-cost digital cameras with large field-of-view. *Proceedings of the ASPRS 2015 Annual Conference*.
- [5] GRUSSENMEYER, P. and AL KHALIL, O., 2002. Solutions for exterior orientation in photogrammetry: a review. *The Photogrammetric Record* 17, 615–634.
- [6] LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., and BOEHM, J., 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. De Gruyter.
- [7] WOLF, P., DEWITT, B., and WILKINSON, B., 2014. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. McGraw-Hill Education.
- [8] WENZEL, K., ROTHERMEL, M., FRITSCH, D., and HAALA, N., 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL*, 251–258.
- [9] GÜLCH, E., 1995. Automatic Control Point Measurement. *Photogrammetric Week 1995* 185–196.
- [10] KRAUS, K. and WALDHAUSL, P., 1998. *Manuel de photogrammétrie*. Hermes, Paris.
- [11] AFSHARNIA, H., AZIZI, A., and AREFI, H., 2015. Accuracy Improvement By the Least Squares Image Matching Evaluated on the Cartosat-1. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W5*, 11–14. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-11-2015
- [12] REMONDINO, F., SPERA, M.G., NOCERINO, E., MENNA, F., NEX, F., and GONIZZI-BARSANTI, S., 2013. Dense image matching: Comparisons and analyses. *Proceedings of the Digital Heritage 2013* 1, 47–54.
- [13] REMONDINO, F., SPERA, M.G., NOCERINO, E., MENNA, F., and NEX, F., 2014. State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record* 29, 144–166.
- [14] LOWE, D.G., 2004. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60.
- [15] BAY, H., TUYTELAARS, T., and VAN GOOL, L., 2006. SURF: Speeded up robust features. *Lecture Notes in Computer Science* 3951 LNCS, 404–417.
- [16] HARRIS, C. and STEPHENS, M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988* 147–151.
- [17] SZELISKI, R., 2010. *Computer Vision : Algorithms and Applications*. Springer.
- [18] HIRSCHMULLER, H., 2011. Semi-Global Matching Motivation, Developments and Applications. *Photogrammetric Week* 173–184.
- [19] HIRSCHMULLER, H., 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2, 807–814.

- [20] FURUKAWA, Y. and PONCE, J., 2009. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32, 1362–1376.
- [21] Pix4D. 2016. Pix4D Mapper 2.1 User Manual. 2016.
- [22] Agisoft. 2018. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. 2018.
- [23] Wikipedia., 2019. 3DF Zephyr. https://en.wikipedia.org/wiki/3DF_Zephyr (03/09/2019).
- [24] MURTIYOSO, A.; GRUSSENMEYER, P. Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: Dense matching issues, comparison and case studies. *Photogramm. Rec.* 2017, 32, 206–229.
- [25] Gagliolo, S., Ausonio, E., Federici, B., Ferrando, I., Passoni, D., Sguerso, D. 2018. 3D culture heritage documentation: a comparison between different photogrammetric software and their products. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2, pp. 347-354.
- [26] JAMES, M.R.; ROBSON, S.; SMITH, M.W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf. Process. Landf.* 2017, 42, 1769–1788.