نمذجة القطع الأثرية رقمياً بالطرائق التصويرية

د. مجد الشوا[1]

الملخص

أصبحت المساحة التصويرية الأرضية إحدى الطرائق الأكثر فعّالية في التوثيق الرقمي للأوابد الأثرية، وخصوصاً بعد انتشار آلات التصوير الرقمية والبرمجيات المرتبطة بها. إلا أن انتشارها الواسع قد يؤدي إلى نتائج مغلوط بها تماماً، إذا لم يشرف عليها خبراء مساحيّون يستطيعون تقييم الدقة والصحة للمعطيات والعمليات كلّها. تناول هذا المقال عملية إنتاج نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد لبعض تماثيل المتحف الوطني في مدينة دمشق بطرائق المساحة التصويرية الأرضية القريبة. يُلقى الضوء على بعض مبادئ المساحة التصويرية الرقمية والرؤية بمعونة الحاسب الضرورية لإنجاز النموذج الرقمي للأجسام. إن النموذج المُقدّم في هذه الورقة هو من نوع "السطوح" المُعبّر عنها بشبكة تثليث غير منظمة يمكن بناؤها بدءاً من غمامة نقاط كثيفة مستنتجة بطرائق تصويرية. يجري تناول بعض النقاط المهمة في إنجاز النموذج النهائي مثل معايرة آلة التصوير وتحضير جلسة التقاط الصور وتخطيطها مع متطلباتها. يناقش قبول النموذج أو رفضه بحسب مؤشرات الدقة المرافقة لعمليات إنتاج النموذج.

الكلمات المفتاحية: التوثيق، المساحة التصويرية القريبة، مطابقة الصور، النمذجة، التثليث.

[1] مدّرس، قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، سورية.

3D modeling of archaeological pieces using photogrammetry

Dr. Majd Al-Shawa[(1)]

Abstract

Close range photogrammetry has become one of the most effective ways for digital documentation of culture heritage, especially with the popularity of digital cameras and related software. Nevertheless, this risks yielding erroneous results if topographic experts don't interfere in determining and assessing the accuracy and the precision of data and operations. This article approaches the procedure of modeling some of the national museum of Damascus using the close range photogrammetry technique. Some principles of digital photogrammetry and computer vision are highlighted .The introduced model is a surface type one which consists of a mesh of irregular triangulation built on a base of dense point cloud resulted in a photogrammetric ways. The main steps of modeling procedure are elaborated such as camera calibration and the planning of photo acquisition session. Final model is verified according to the indices of the accuracy of archeological modeling.

Key words: Documentation, Close range photogrammetry, Image matching, Modeling, Triangulation.

[(1)] Instructor, Department of Topography, Faculty of Civil engineering, Damascus University, Syria.

1. المقدمة

أصبحت النمذجة الرقمية ثلاثية الأبعاد للتراث الثقافي الوطني ضرورة ملحّة كونها تمكّن من ترميمه أو تشكيل نسخ مطابقة. تستند الطريقة الأقل تكلفة الى الخبرة في استخدام صور آلات الهواة المحمولة يدوياً وتحليلها. وقد جعلت هذه التقنية عملية إعادة التكوين ثلاثي الأبعاد لمشاهد العالم الحقيقي أسهل وأكثر انتشاراً كونها متاحة للمستخدمين جميعاً دون تكلفة تُذكر. إلا أن الانتشار الواسع لهذه التقنية قد يحمل في طيّاته مساوئً كتجاهل متطلبات الصّحة والدقّة، وكجعل العمل مؤتمتاً معتمداً على البرمجيات المتوافرة كمصدرٍ لا يخطئ. لذا يأتي هذا المقال ليوضح أسس العمل الصحيح في النمذجة وليتناول حيثيات هذه العملية كلّها. إن تسلسل سرد الأفكار في هذه الورقة مطابق لتسلسل العمل الحقلي المنجز من أجل رقمنة الأوابد الأثرية وتوثيقها.

2. مراحل إنجاز النموذج الرقمي للآثار

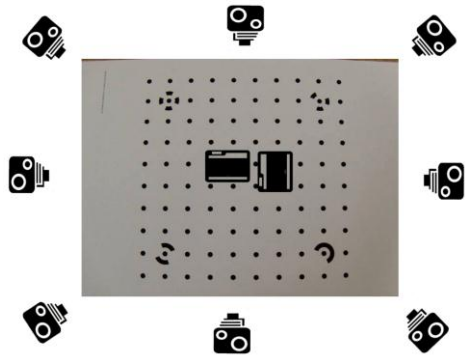
عالجت الدراسة الحالية حالة القطع الأثرية الصغيرة والمتوسطة (أقل من 2m).

2.1 معايرة آلة التصوير

تعني معايرة آلة التصوير حساب المعاملات الهندسية الخاصة بها ألا وهي:

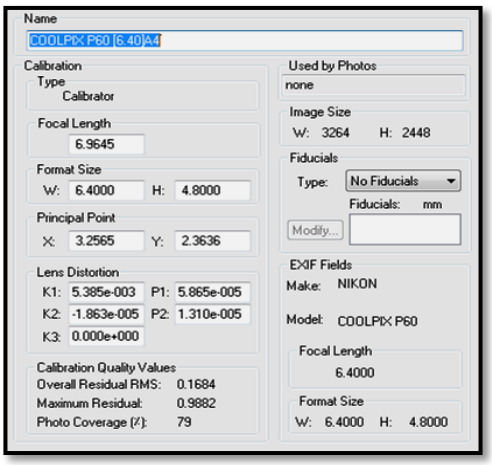
- البُعد بين مركز الصورة ومركز الحساس البصري في الآلة الذي يقترب من الصفر، كلما كانت آلة التصوير من نوعيةٍ عالية.
- البُعد المحرقي وأبعاد الحساس الداخلي.
- معامل المقياس الطولي والعرضي للبيكسل.
- الزيغ البصري (distortion) بنوعيه القطري والمماسي على أطراف العدسة.

تفيد هذه المعاملات بالانتقال من جملة الصورة (جملة البيكسل) إلى الجملة الميلمترية لحساس (أو مستشعر) آلة التصوير مما يفيد في إعادة تشكيل أشعة الحزمة الضوئية بالنسبة إلى بعضها بعضاً في كل صورة. استخدمت آلة تصوير هواة من النوع Nikon™ Coolpix P60 لالتقاط عشر صور ثمانٍ منها من جهة زوايا ومنتصفات أضلاع رقعة المعايرة النظامية التي يزوّد بها برنامج PhotoModeler® Scanner (شكل 1) والتقطت صورتان عموديتان تقريباً على رقعة المعايرة بوضعين متعامدين للآلة من أجل استخدامها جميعاً في المعايرة.



الشكل (1) الرقعة المعيارية وتخطيط لتوزيع الصور العشر المنصوح بها من أجل حساب معايرة آلة التصوير.

نلاحظ في الشكل (1) أثر تشوه الزيغ البصري على أطراف العدسة، فسطر النقاط الطرفيّة لايبدو مستقيماً كما هو عليه في الواقع. يوضّح الشكل (2) معاملات التوجيه الداخلي المحسوبة لآلة التصوير Nikon™ Coolpix 60 قبيل عملية تصوير التماثيل. يبلغ حقل الرؤية لآلة التصوير هذه 41.6°×53.7 تقريباً وعدد واحدات الاستقبال الضوئي في الحساس (أي البيكسلات) W×H = 3264×2448.



الشكل (2) معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير المستخدمة نتيجة عملية المعايرة في برنامج PhotoModeler® Scanner.

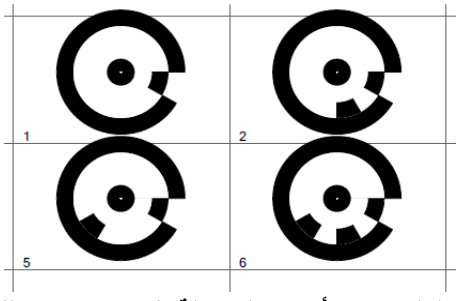
طُبعت الرقعة المستخدمة في المعايرة على ورقة A2، وصورت من مسافة وسطية 1m بحيث تحتل الرقعة أكثر من 80% من المساحة الكاملة لكل صورة.

لم تتجاوز رواسب تحديد موقع أي من نقاط الرقعة قيمة 0.4 بيكسل. لايفيد التوجيه الداخلي في إعادة تشكيل الحزمة الضوئية لكل صورة كما كانت لحظة التقاط الصورة فحسب، بل يساعد على تخليص الصور الملتقطة من تأثير الزيغ البصري الغير مهمل في حالة آلات التصوير التجارية (الشكل 3). ستستخدم هذه الصور لاحقاً في مرحلة التوجيه النسبي.

الشكل (3) صورة مكافئة للصورة الملتقطة بعد تخليصها من تأثير الزيغ البصري
(تمثال كاهن مرتد ثوب الكهنوت مقطوع الرأس منحوت من حجر بركاني – مدينة منبج)

2.2 الالتقاط الآلي للأهداف في الصورة:

في الغالبية العظمى من الحالات التصويرية لابدّ من تحديد نقاط مشتركة بين مزدوجات الصور بهدف التوجيه النسبي بينهما. أصبح تزويد الجسم المراد رقمنته تصويرياً ببعض الأهداف المعرّفة مسبقاً والواضحة بالنسبة الى المستخدم أمراً ضرورياً وذلك لسببين: الأول هو صعوبة ايجاد نقاط مميّزة واضحة على الجسم (حالة تمثال ذي مادة متجانسة)، والثاني هو الموثوقيّة الكبرى لتوجيه الصور نسبياً باستخدام الأهداف بالمقارنة بالبحث عن النقاط المشتركة يدوياً من قِبل المستخدم. يبيّن الشكل (4) الأهداف التي يزوّد بها برنامج Photomodeler™ Scanner التي استُخدمت في الجزء العملي لهذا البحث.



الشكل (4) بعض الأهداف المعياريّة التي استخدمت للتوجيه النسبي للصور

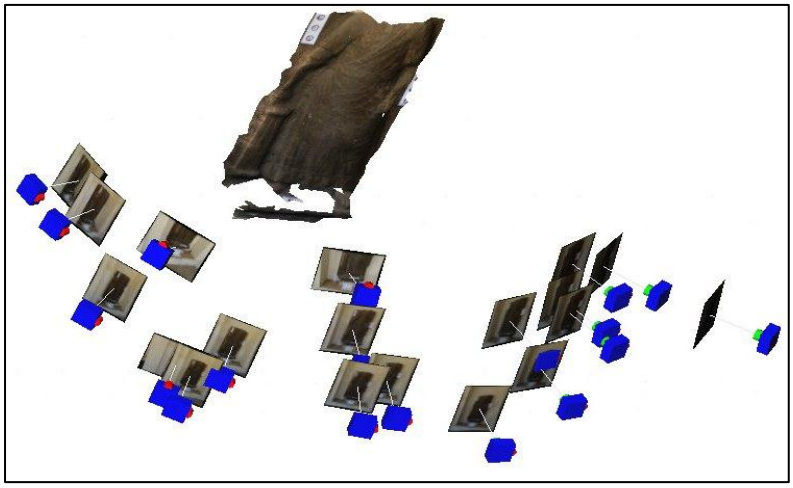
تساعد الأهداف أيضاً على تعريف مقياس المجسم ثلاثي الأبعاد الناتج (كانت المسافة بين مركزي هدفين متتاليين في الأمثلة المدروسة 7.5cm). يُعدّ تعريف المقياس الحقيقي للمجسم بديلاً عن عملية التوجيه المطلق المعروفة في عالم المساحة التصويرية، وذلك لهذا النوع

من الأعمال. تُلصق الأهداف في محيط الجسم وتوزّع حوله، ما أمكن ويجب أن تكون في عدة مستويات مختلفة حرصاً على عدم التوصل إلى حالات حدّية عند حساب التوجيه النسبي.

إن ما يتعرّف إليه من الأهداف الموضّحة بالشكل هو فقط الدائرة المركزية أمّا الشكل المحيطي فيساعد على تدوير الأهداف بزوايا معينة ليجري تعرّفها في أكثر من وضع، ومن ثمّ التحقق بشكل كامل من تحديدها بشكل مشترك بين الصور. تستخدم عادةً تقنية المطابقة المشتركة الناظمية normalized cross-correlation لتحديد مكان الهدف في صورة واحدة، ثم لتحديد مواضع الأهداف المشتركة بين صورتين لاحقاً وذلك بالاعتماد على القيم اللونية المتماثلة. إن التقنية السابقة تقف عاجزة في حال اختلاف التعرض الضوئي لكل من الأهداف واختلاف ميل مستو الهدف في الصورة الوجهة واختلاف شكل الهدف من صورة إلى أخرى بحسب اختلاف المحور الرئيسي للحزمة الضوئية في كل صورة. تزداد صعوبة البحث عن الأهداف عندما نبحث عن مواقع ذات الهدف المكرر في صورتين مختلفتين أكثر مما هي عليه في حالة البحث عن وجود هدف معياري في صورة واحدة. من أهم الطرائق المستخدمة لحل هذه المشكلة طريقتا حساب المصفوفة الأساسية بالاعتماد على الإجماع على العينة العشوائية RanSAC (Hartley, 2004) وتحويل السّمات المستقل عن المقياس SIFT (Lowe, 2004).

2.3 عملية التقاط الصور:

اختيرت أربعة تماثيل موجودة في المتحف الوطني بدمشق لنمذجتها وتوثيقها باستخدام تقنيات المساحة التصويرية. من المنصوح به بشكل عام التقاط صور فائضة ومن ثم اختيار أفضلها في أثناء مرحلة المعالجة اللاحقة المكتبية. على المصوّر أن يحترم شرط تغطية أي نقطة من كل تفصيل من الجسم على الأقل بمزدوج صور تكون الزاوية بين محوريها ضيِّقة (أقل من 20 درجة). قد يفرض هذا الشرط الاقتراب من الجسم أو وضع آلة التصوير بارتفاعات مختلفة بالنسبة الى الجسم. إلا أنه يجب التقاط صور من مسافات أبعد تغطي وتطوّق كامل الجسم لأنها قد تشكل مزدوجاً مع صورة تفصيلية ما لم ينجح التقاط صورتها الأخرى كما أنها تفيد في التكّسية النهائية للمجسم المنشود. إن الشروط التقليدية للمساحة التصويرية تفرض وجود تداخل بنسبة 60% بين الصور لكننا بنتيجة الخبرة ننصح برفع هذه النسبة إلى 80% كي تظهر معظم الأهداف المشتركة في مزدوج الصور ممّا يرفع من دقة عملية التوجيه النسبي، إذ إنّ هامش الخطأ في هذا النوع من الأعمال ضئيل جداً. يبيّن الشكل 5 مجموع الصور التي التقطت لتمثال الكاهن والتي وجّهت نسبياً ومن ثمّ حساب موقع آلة التصوير واتجاهها لحظة التقاط الصور. نلاحظ غياب مزدوج أو اكثر يغطي قدمي التمثال ممّا سيؤدي الى غياب هذا الجزء في النموذج النهائي المبيّن في الشكل (5) أيضاً.



الشكل (5) توضيح لأماكن آلة التصوير لحظة التقاط الصور مع تبيان موقع وتوجيه مستو الصورة (الموجب).

2.4 التوجيه النسبي:

من المُسلّم به في علم المساحة التصويرية استحالة حساب إحداثيات الجسم انطلاقاً من صورة واحدة، لذا تستخدم عادة صورتان من أجل حلّ معضلة حساب معامل المقياس. عند معرفة إحداثيات خمس نقاط مشتركة في كل من الصورتين (على الأقل) نستطيع حساب الموقع والدوران النسبي للصورة الثانية بالنسبة إلى مقابلتها الأولى. توجّه الصور المتعددة سواءً باستخدام المزدوجات مثنى مثنى أو ككتلة واحدة (block) إذ تتم الإفادة من النقاط المشتركة بين ثلاث صور أو أكثر. أياً كانت الطريقة المستخدمة في حساب التوجيه النسبي فما يُهمّ لهذا النوع من العمل هو تقييم دقة العملية. لن نستخدم الصور التي تزيد دقة حساب التوجيه النسبي فيها على بيكسلٍ واحد لأيٍ من الأهداف (النقاط المشتركة) في عملية توليد الغمامات النقطية. يبيّن الجدول (1) جزءاً من نتائج عملية التوجيه النسبي حيث يبيّن الحقلين يسار القارئ أدناه حساب خطأ البارالاكس لكل من الأهداف المشتركة مقدراً بالبيكسل (الأسوأ بينهم وخطأ متوسط التربيع للمجموع). كما تظهر الحقول الثلاثة الأخيرة توجيه الصور ممثلاً زوايا أويلر Euler angles الثلاث (κ,φ,ω) لمستو حساس آلة التصوير لكل من الصور الملتقطة.

الجدول (1) جزء من نتائج عملية التوجيه النسبي احدى مجموعات الصور المستخدمة في التوثيق.

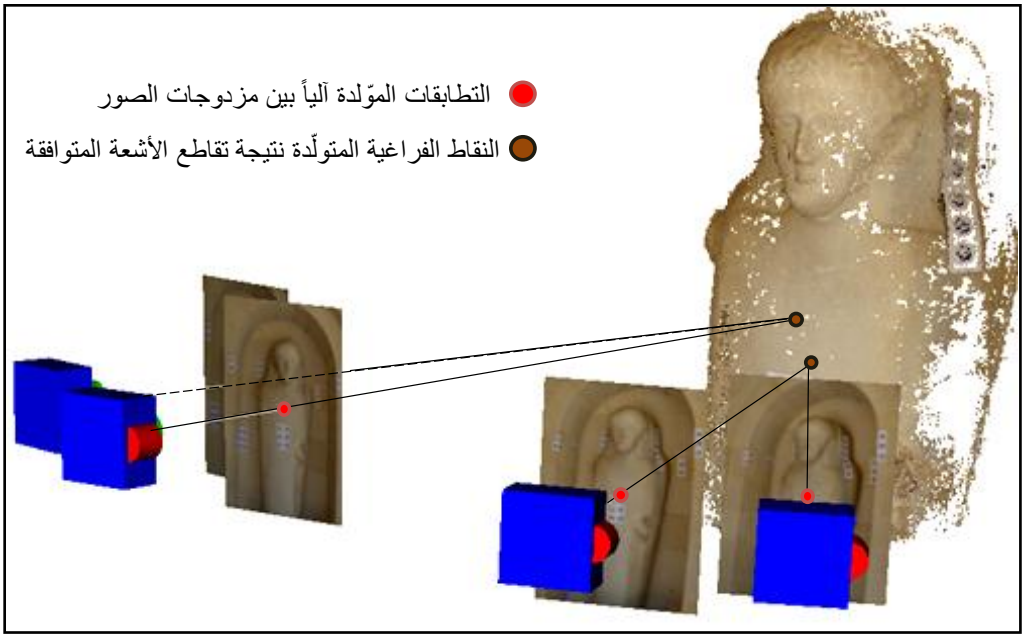
Photo #	Largest Residual (pixels)	RMS Residual (pixels)	Kappa (deg.)	Omega (deg.)	Phi (deg.)
1	0.811	0.281	-6.132	98.041	-10.345
14	0.799	0.339	-1.886	13.990	-3.583
8	0.741	0.265	-0.559	-1.220	-0.462
19	0.727	0.262	83.315	69.184	-5.945
4	0.653	0.228	-5.380	53.031	-2.311
5	0.643	0.213	-4.112	38.322	-0.053
6	0.593	0.179	-3.560	26.180	0.643
12	0.526	0.217	-6.308	108.017	-11.364
7	0.445	0.137	-2.772	13.501	-0.915
20	0.410	0.213	0.373	-8.371	-1.653
23	0.364	0.193	-2.292	23.919	-2.424
10	0.360	0.152	-5.388	48.504	-4.360
2	0.350	0.123	-6.351	83.310	-6.058
18	0.332	0.130	-6.750	69.795	-5.936
3	0.312	0.179	-5.999	69.925	-5.830
13	0.269	0.173	82.371	44.727	-19.344
11	0.242	0.139	-5.508	48.440	-3.270
17	0.240	0.152	82.632	82.324	-27.287

2.5 توليد غمامة النقاط الكثيفة:

تولّد عدة غمامات من النقاط ثلاثية الأبعاد من خلال البحث الآلي عن المزيد من النقاط المشتركة التي يقرر كثافتها المستخدم. بين كلٍّ من مزدوجات الصور ومقاطعة الأشعة الضوئية المارة بها في الفراغ (أو ما يسمى بفضاء الجسم). يبيّن الشكل (6) مثالاً مبسّطاً بمزدوجين فقط مع إظهار لكامل الغمامة الناتجة عن عدة مزدوجات أخرى. إن عملية البحث الآلي قد أصبحت هنا أيسر بكثير من المرحلة السابقة (مرحلة تحديد الأهداف وتعرّفها الآلي) ذلك أن عناصر التوجيه النسبي قد حُسبت بشكل دقيق مما يسمح بتوليد مئات النقاط الفراغية التي سندعوها الغمامات الجزئية. لم ينجز هذا الطور من المعالجة بشكل مؤتمت تماماً حيث يتدخل المستخدم في سير العملية من خلال تحديده لأفضل المزدوجات، ومن خلال فحصه البصري لجودة كل من الغمامات الناتجة. خضع اختيار مزدوج الصور الموجهّة خلال عملية توليد الغمامات النقطية للشروط الآتية:

1- ألاّ يزيد خطأ البارالاكس والداخلة في عملية التوجيه النسبي للصورتين على 1 بيكسل

2- ألاّ تزيد نسبة القاعدة التصويرية إلى العمق "b/h" على 0.5 وألاّ تقل عن 0.1.
3- ألاّ تتجاوز الزاوية بين محوري الصورتين البصريين 20°.
4- ألاّ تكون الغمامة الناتجة عالية الضجيج (nois)، أو تحتوي كثيراً من النقاط اللامنتمية للجسم.



الشكل (6) تقاطع الأشعة الضوئية المارة بالنقاط المتوافقة بغاية توليد الغمامات النقطية
(التمثال هو غطاء تابوت فينيقي طراز يوناني مصري عليه نحت سماوه أو وجه امرأة)

إنّ الشروط الثلاثة الأولى تضمن بشكلٍ لازمٍ وغير كافٍ توليد غمامات كثيفة وذات تغطية عالية للجسم، إذ انّ هذه العملية تجابهها عادةً عدة صعوبات نذكر منها:

1- الغموض الحاصل لدى تحديد القيم اللونية من أجل ايجاد النقاط المشتركة الكثيفة آلياً بين مزدوج الصور. يعزى هذا الغموض لاختلاف شروط التعرض الضوئي لدى التقاط الصور.
2- الاستمرارية الكاملة في مادة جسم التمثال ممّا يجعل من الصعب جداً تحديد نقاط مميزة في إحدى الصور، ومن ثم تحديد مقابلاتها في الصورة الثانية.
3- الضعف في وصول أشعة الحزمة الضوئية إلى بعض التفاصيل المتراجعة (حتى وإن كانت الزاوية بين محوري الصورتين ضيّقة–الشرط 3) وهذا ما يسمى عادة بتخبئة الجسم لنفسه (self occlusion).

إن مُجّمل الصعوبات السابقة يجعل من المفضّل تدخل المستخدم يدوياً واختياره للغمامات الفضلّى، وحذفه لبعض الغمامات أو بعض النقاط. يجب التنويه هنا بأن التقاط عدد كبير من الصور n يؤدي إلى خيارات أوسع (توافيق C(n,2)) بالنسبة إلى المستخدم بتحديد المزدوجات التي ستدخل في تحديد الغمامات. وقد يضطر المستخدم أحياناً لمخالفة الشروط أعلاه كزيادة نسبة القاعدة التصويرية إلى العمق، أو زيادة الزاوية بين محوري التصوير بهدف زيادة التغطية بالنقاط لكن ذلك يحتّم فحص الغمامات الناتجة بصرياً بدقة وانتباه شديدين.

2.6 إصلاح الغمامات الجزئية وتنظيفها:

نظراً إلى أن الصور جميعها قد وجّهت نسبياً بالنسبة إلى بعضها بعضاً فإن غمامات النقاط الجزئية يجب أن تتطابق مع بعضها بعضاً من الناحية النظرية. إن وجود الأخطاء النظامية والعرضية الناتجة عن معايرة آلة التصوير وعن عملية التوجيه النسبي ثم عن حساب إحداثيات النقاط المتقابلة في المزدوجات وحساب الإحداثيات الفراغية يجعل الغمامات الجزئية مَشوبة

بأخطاء صغيرة تحمل بعض الضجيج ولا تتطابق تماماً مع بعضها بعضاً. لذا كان لابدّ من سلسلة عمليات متتالية بهدف إصلاح الغمامات الجزئية الناتجة وتنظيفها وهي:

الإرجاع ثلاثي الأبعاد للغمامات (أو ما يسمى بالتسجيل registration): تهدف هذه العملية الى تعريف تحويلٍ صلد ثلاثي الأبعاد (انسحاب ودوران فقط) يُطبق على الغمامات الجزئية واحدةً تلو الأخرى كي تقترب إلى إحدى الغمامات (الأوسع تغطية والأقل ضجيجاً). مازالت طريقة النقطة الأقرب التكرارية ICP (Besl,1992) هي الطريقة الفضلّى والمستخدمة على أوسع نطاق لإنجاز التسجيل. بعد إتمام هذه المرحلة تُدمج الغمامات الجزئية جميعها بغمامة واحدة.

عزل النقاط المنفردة والبعيدة عن الغمامة: هنالك مرشحات خاصة لعزل النقاط الشاذة تعتمد على بعد هذه النقطة عن مجاوراتها وبعتبات معينة يزوّد بها المستخدم بحسب كثافة الغمامة التي قام بتوليدها.

التنعيم (smoothing): تقوم هذه العملية بإزاحة النقاط البعيدة نسبياً (مسافة أقل من العتبة السابقة) عن مجاوراتها كي تعود وتدمج مع جوار نسبي لها يحدده المستخدم.

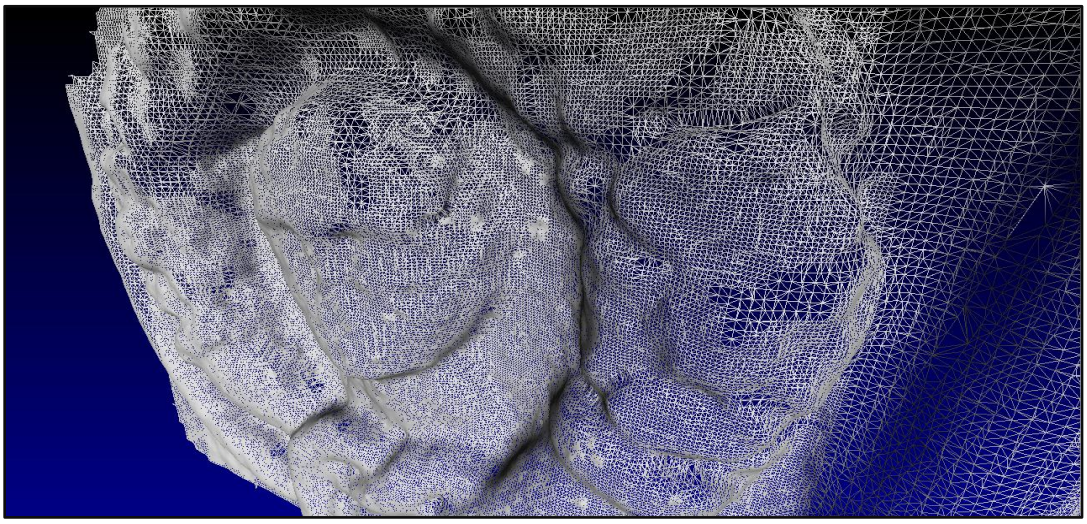
2.7 إنشاء شبكة التثليث (meshing):

مع اكتفاء بعض المنمذجين بالصيغة النقطية للغمامة (إحداثيات فراغية x,y,z فقط لمئات النقاط)، إلّا أن هذا النموذج يظل قاصراً لعدة أسباب منها:

- حجوم التخزين العالية التي تعيق استثماره والافادة منه (كتصنيع نماذج طبق الأصل بواسطة روبوتات نحّاته، أو كنشره على الشبكة وعرضه ضمن مشاريع المتاحف الافتراضية).
- صعوبة التكّسية بالصور لأن النقاط من الممكن ان تلوّن بلون ما ولكن تظل هنالك فراغات بينها، وقد تكون هذه الفراغات غير منتظمة وتابعة لشروط التصوير وتوليد الغمامة.
- صعوبة توجيه السطح (داخلي – خارجي)، ومن ثمّ صعوبة التظليل والإضاءة والعمليات الإظهارية الموافقة.

هنالك عدة حلول مطروحة كإيجاد عدة سطوح هندسيّة تمرّ بشكل أمثلي (fit) بغمامة النقاط أو بأجزاءٍ منها. إذا كانت الغمامة تمثل رفعاً طبوغرافياً لواجهة معمارية كما بُنيت (as built) فإن تلك السطوح ستكون منتميةً لمستويات واسطوانات ومخاريط وغيرها من الأوليات الهندسية، لكن في حالة التماثيل فإننا بحاجة لسطوح مرنة متماسّة ومستمرّة (Nurbs) أعقد وأكثر طواعيةً كي توائم تعرجات السطح. أياً كانت معاملات هذه السطوح (عدد العقد الحاكمة لها وأوزانها) فإنه من الصعب جداً أن تعبّر عن اهتراء سطح التمثال وخشونته أو اقتطاع أو انهيار أجزاءٍ منه. فقد كان خيارنا في هذا العمل إذاً إنشاء شبكة تثليث (mesh) تصل بين النقاط الأساسية والمعبّرة من الغمامة لتحقيق نموذج سطوحي أكثر ملاءمة للجسم المُراد نمذجته.

إن المبدأ العام لاختيار ثلاثيات النقاط التي تشكل رؤوس المثلثات هو تثليث دولوني (Dalunay) الفراغي، إلا أن هنالك بعض الشروط التي يجب مراعاتها كضرورة دمج المثلثات في المناطق المتصلة ذات الميل الواحد، وتجنب دمجها في المناطق معقدة الانحناءات، كما يجب مراعاة تعبئة الفجوات (fill holes) التي يقصد بها المناطق الكبيرة نسبياً الخالية من أي نقطة من نقاط الغمامة. اختيرت في هذا العمل مقاربة بواسون (Poisson) كما قدّمها (Kazhdan, 2005). تعتمد هذه الطريقة على تقسيم الغمامة لعدّة مكعبات (Voxel) بشكل تكراري (Octree) حيث يستمر التقسيم n مرة في المناطق المعقدّة وقد يقف مرة أو اثنتين في المناطق الأبسط. تُعرّف في كل مكعب وظيفة ضمنية تحدد ما النقاط التي ستنتمي إلى السطح المنشود وما النقاط التي تقع داخله أو خارجه. يتم الوصل بين النقاط المنتمية لاحقاً حسب تثليث دولوني. نفّذت هذه المرحلة بالاستعانة ببرنامج (MeshLab) (شكل 7) اذ اكتفينا بسلم من ثمانِي (n=8) درجات متلاحقة من التقسيم (Octree) في مقاربة بواسون.



الشكل (7) التثليث المطبّق على نقاط الغمامة –
يمكن ملاحظة اختلاف كثافة التثليث بحسب تعقيد الشكل، أو عند وجود فجوات في البيانات.

2.8 عملية التكّسية (texture):

إن التثليث الصحيح لغمامة النقاط يجب أن يُنتج سطوحاً موجّهة بحيث يمكن التمييز بين السطح الخارجي والسطح الداخلي للتمثال، وعادةً ما تُملأ المثلثات بلونٍ ما ويكون السطح الخارجي مضاءً والسطح الداخلي معتماً. إن عملية "تلوين" هذه السطوح لا تؤثر في الدقة الهندسية للنموذج، لكنها مرحلة لا بدّ منها لتقديم نموذج محاكٍ للواقع ما أمكن. نختار الصورة التي يكون توجيهها مقارب لتوجيه سطح كل من مثلثات النموذج ومن ثمّ تحسب مواقع رؤوس المثلث الفراغية في جملة الصورة الميلّمتريّة المستوية بعملية إسقاط معاكس. يُحسب متوسط القيم اللونية لبيكسلات المسقط، ويُخصص للمثلث الفراغي الأصل. يبيّن الشكل (8) النموذج المكسّى (أو النهائي) لقطعة أثرية بازلتية من جنوب القطر. وقد عرض نموذجها الشبكي في الشكل (7).

الشكل (8) صورة للنموذج النهائي ثلاثي الأبعاد لقطعة من شاهدة قبر
(نحت نافر للمتوفى مع إكليل وأفعوان)

تبرز هنا ضرورة أخذ تجانس الإضاءة بالحسبان لدى التقاط الصور وخصوصاً بالنسبة إلى الأوابد والتماثيل المعرّضة مباشرة لأشعة الشمس كي لا نحصل على أجزاء منارة وأجزاء عاتمة في النموذج نفسه. (الشكل 9) هو النموذج النهائي لجزء من طنف (أو إفريز) مثلث لبناء أثري ويظهر عليه تأثير الظلال الغير المرغوب فيها الذي نوصي بتجنبه حين التقاط الصور. قد يتطلب ذلك التصوير صباحاً لأحد جوانب المنشأ، ثم العودة في نهاية الظهيرة مثلاً لتصوير الجانب الآخر. إن وجود الظلال في الصور الملتقطة يؤدي عادةً أيضاً إلى تكثيف النقاط النقاط المشتركة لدى هذه الظلال، فهي تمثل بطبيعة الحال فوارق لونية محسوسة. إلا أن هذه الكثافة وهمية فهي لا تعبر عن تفصيلات وتعقيدات في الجسم.

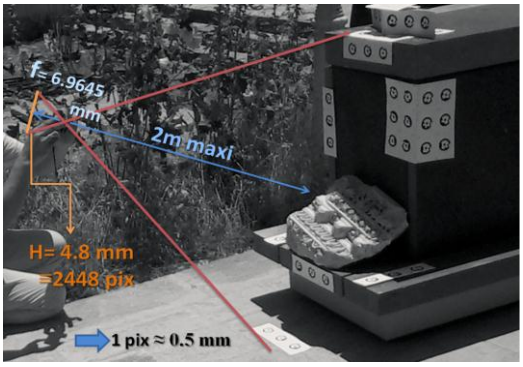
الشكل (9) الأثر غير مرغوب فيه للظلال في تكسيّة النموذج ثلاثي الأبعاد

3. النتائج والتوصيات:

قد تؤدي المبالغة في عملية التنعيم (smoothing) في أثناء بناء النموذج السطوحي المثلثاتي إلى انحدار الدقة انحداراً واضحاً ولا سبيل لتقدير الخطأ المترافق مع هذه العملية. لذا فإننا نوصي بإنجاز هذه العملية بيدٍ خبيرة وبمراقبة دقيقة وعدم الإتكال على قدرات الحاسب والبرمجيات.

إن اقتناء آلات تصوير ذات دقة تميزية (resolution) أعلى يؤدي إلى نماذج أكثر دقةً ولكنه يتطلب حواسب ذات قدرة أعلى على المعالجة ووقتاً أطول. إن العناية بتحضير العمل كإلصاق الأهداف الصاقاً ثابتاً لا يتحرك بفعل الرياح أو حرارة الجوّبل يزيل احتمال الخطأ بتحديد هذه الأهداف آلياً ويضمن نجاح عملية التوجيه النسبي.

عالج هذا المقال موضوع التوثيق الأثري باستخدام المساحة التصويرية الأرضية وبآلات تصوير هواة رخيصة الثمن. وقد تمّ تبيان أن الدقة الموضوعية لغمامة النقاط تتأثر بدقة عمليتين مهمتين هما المعايرة والتوجيه النسبي الآلي اللاحق لعملية التعرف الآلي إلى الأهداف. وكان من اليسير إنجاز كل من هاتين العمليتين بدقة أقل من (1 بيكسل). ونظراً الى أن توليد غمامة النقاط يتم بكثافة (Sample rate) لا تتجاوز (1 بيكسل) في كل صورة من صور المزدوج فإننا لا نتوقع أن تزيد قيمة الخطأ الناتج في هذه العملية على (1 بيكسل) أيضاً. بتطبيق قانون انتشار خطأ متوسط التربيع فإن الدقّة الكلية الناتجة للنموذج لن تتجاوز (2 بيكسل). وبحساب بسيط نجد أن متوسط أبعاد مسقط البيكسل على الجسم 0.5 mm (شكل 10)، لذا نتوقع أن دقة غمامة النقاط الناتجة هي من مرتبة 1 mm.



الشكل (10) حساب تقريبي لأبعاد مسقط بيكسل وسطي على الجسم
(f البعد المحرقي، H البعد الرأسي للحسّاس الضوئي الموجود في آلة التصوير الرقمية مقدراً بالـ mm وبالبيكسل)

الخاتمة

إن التجارب المقدّمة في هذه الورقة لم تتعدَّ مبادرةً بسيطةً على المستوى الشخصي وبمساعدةٍ كريمةٍ من مدير المتحف الوطني بدمشق ومسؤوليه. وقد استطعنا التوصل إلى نماذج حاسوبية ثلاثية الأبعاد محاكية تماماً للواقع وبدقة ميلمتريّة. إلا أنه لا بدّ من خطوات متمّمة قد تفرض مثلاً إخراج التمثال ووضعه على منصات دوّارة بهدف السماح بالتقاط صور له من الاتجاهات كلّها. نأمل بأن تسهم الدراسة المقدّمة بتبني مشاريع نمذجة للتراث الوطني على المستويات الرسمية. إن الموضوع الذي تمّ تناوله هو موضوع متعدد (أو عابر) للاختصاصات (interdisciplinary)، ومازال بحاجة إلى إسهام اختصاصيّ الآثار والمتاحف لتفسير النتائج وتقييمها.

مسرد المصطلحات:

As built	كما بُني
Block	دفعة واحدة
Distortion	الزيغ
Euler angles	دورانات أويلر
Fill holes	إملاء الفجوات
Fit	إلباس
ICP: Iterative closest point	النقطة الأقرب التكرارية
mesh	شبكة تثليث
Normalized cross correlation	المطابقة المشتركة الناظمية
Nurbs: Non-uniform rational B-spline	المنحنيات غير المنتظمة
Octree	تقسيم بثمانية مستويات عمق
Pixel	عنصر صورة (بيكسل)
Ransac : Random sample consensus	الاجماع على العينة العشوائية
Registration	الارجاع – التسجيل
Resolution	الدقة التميزية
Sample rate	معدل الكثافة
Self occlusion	الانطباق الذاتي
SIFT: Scale Invariant. Feature Transform	تحويل السمات المستقل عن المقياس
Smoothing	التنعيم
Voxel	عنصر حجمي

REFERENCES المراجع

د. فايز ديب؛ د. عمر الخليل. 2012. توثيق المنشآت الأثرية باستخدام النمذجة ثلاثية الأبعاد متعددة الصور. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية 28(2).

Besl, Paul J.; N.D. McKay (1992). "A Method for Registration of 3-D Shapes". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society) 14 (2): 239–256

Hartley, R.I. and Zisserman, A: Multiple View Geometry in Computer Vision. Second edition. (2004), Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.

Kazhdan. M. Reconstruction of Solid Models from Oriented Point Sels Symposium on Geometry Processing (July 2005).

Lowe, D. G. Distinctive image features from scale-invariant key-points, International Journal of Computer Vision, 60, 2 (2004), pp. 91-110.

Web references: PhotoModeler Online Tutorials: WWW.photomodeler.com/tutorial-vids/online-tutorisals.htm

Received	2015/08/24	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/02/19	قبول البحث للنشر