نمذجة القطع الأثرية رقمياً بالطرق التصويرية

د. مجد الشــوا *

الملخص:

أصبحت المساحة التصويرية الأرضية أحد الطرق الأكثر فعاليّة في التوثيق الرقمي للأوابد الأثرية وخصوصاً بعد انتشار آلات التصوير الرقمية والبرمجيات المرتبطة بها. إلا أن انتشارها الواسع قد يؤدي إلى نتائج مغلوطة تماماً إذا لم يشرف عليها خبراء مساحيّون يستطيعون تقييم الدقة والصحة لكافة المعطيات والعمليات. يتناول هذا المقال عملية إنتاج نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد لبعض تماثيل المتحف الوطني في مدينة دمشق بطرق 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" المُعبّرعنها بشبكة تثليث غير منظمة ، يمكن بناؤها بدءً من غمامة نقاط كثيفة مستنتجة بطرق تصويرية. يتم تناول بعض النقاط الهامة في إنجاز النموذج النهائي مثل معايرة آلة التصوير وتحضير وتخطيط جلسة التقاط الصور ومتطلباتها. تتم مناقشة قبول النموذج أو رفضه بحسب مؤشرات الدقة المرافقة لعمليات إنتاج النموذج.

الكلمات المفتاحية:

التوثيق- المساحة التصويرية القريبة - مطابقة الصور - النمذجة - التثليث.

* مدرّس في قسم الهندسة الطبوغرافيّة - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

1. مقدمة

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

من أهم الابحاث السابقة الرافدة لهذا البحث عمل (ديب - الخليل , 2012) الذي يتناول توثيق المنشآت الأثرية باستخدام النمذجة ثلاثية الأبعاد متعددة الصور ولكن بمقاييس مختلفة عما سيتم تقديمه وباستخدام تقنيات الرسم ثلاثي الأبعاد وتوليد خطوط الكونتور.

2. مراحل إنجاز النموذج الرقمي للآثار

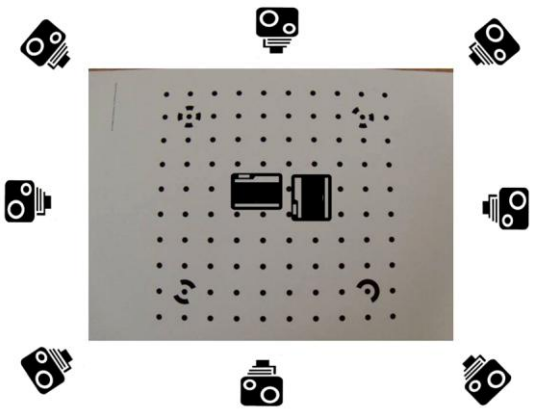
سوف نعالج في الدراسة الحالية حالة القطع الأثرية الصغيرة والمتوسطة (أقل من 2m)

2.1 معايرة آلة التصوير

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

- إحداثيات النقطة الرئيسية في الصورة.
- البُعد بين مركز الصورة و مركز الحساس البصري في الآلة والذي 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 لحسّاس (أو مستشعر) آلة التصوير مما يفيد في إعادة تشكيل أشعة الحزمة الضوئية بالنسبة إلى بعضها البعض 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 صورتين عموديتين تقريباً على رقعة المعايرة بوضعين متعامدين للآلة من أجل استخدامها جميعاً في المعايرة.

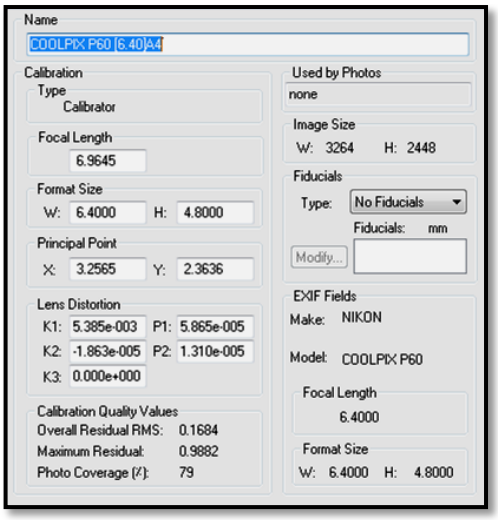


الشكل رقم 1: الرقعة المعيارية وتخطيط لتوزيع الصور العشرة المنصوح بها من أجل حساب معايرة آلة التصوير.

نلاحظ في الشكل رقم (1) أثر تشوه الزيغ البصري على أطراف العدسة فسطر النقاط الطرفيّة لا يبدو مستقيماً كما هو عليه في الواقع. يوضح الشكل رقم (2) معاملات التوجيه الداخلي المحسوبة لآلة التصوير Nikon™ Coolpix P60 قبيل عملية تصوير التماثيل. يبلغ حقل الرؤية لآلة التصوير هذه 53.7×41.6^{o} تقريباً و عدد واحدات الاستقبال الضوئي في الحساس (أي البيكسلات) W×H = 3264×2448.

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

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

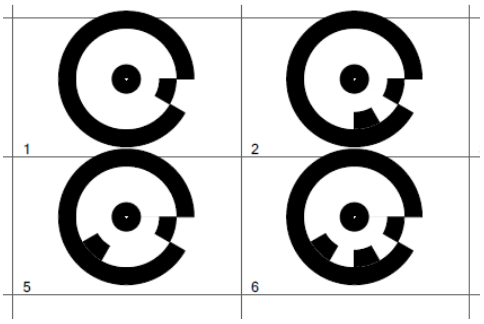


الشكل رقم 2 : معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير المستخدمة نتيجة عملية المعايرة في برنامج PhotoModeler® Scanner

الشكل رقم 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 لا بدّ من تحديد نقاط مشتركة بين مزدوجات الصور بهدف التوجيه النسبي بينهما. أصبح تزويد الجسم المراد رقمنته تصويرياً ببعض الأهداف المعرّفة مسبقاً والواضحة بالنسبة للمستخدم أمراً ضرورياً وذلك لسببين : الأول هو صعوبة ايجاد نقاط مميّزة واضحة على الجسم (حالة تمثال ذو مادة متجانسة) والثاني هو الموثوقيّة الأكبر لتوجيه الصور نسبياً باستخدام الأهداف بالمقارنة مع البحث عن النقاط المشتركة يدوياً من قِبل المستخدم. يبيّن الشكل (4) أدناه الاهداف التي يزوّد بها برنامج Photomodeler™ Scanner والتي استُخدمت في الجزء العملي لهذا البحث.



الشكل رقم 4 : بعض الأهداف المعياريّة التي استخدمت للتوجيه النسبي للصور

تساعد الأهداف أيضاً في 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.

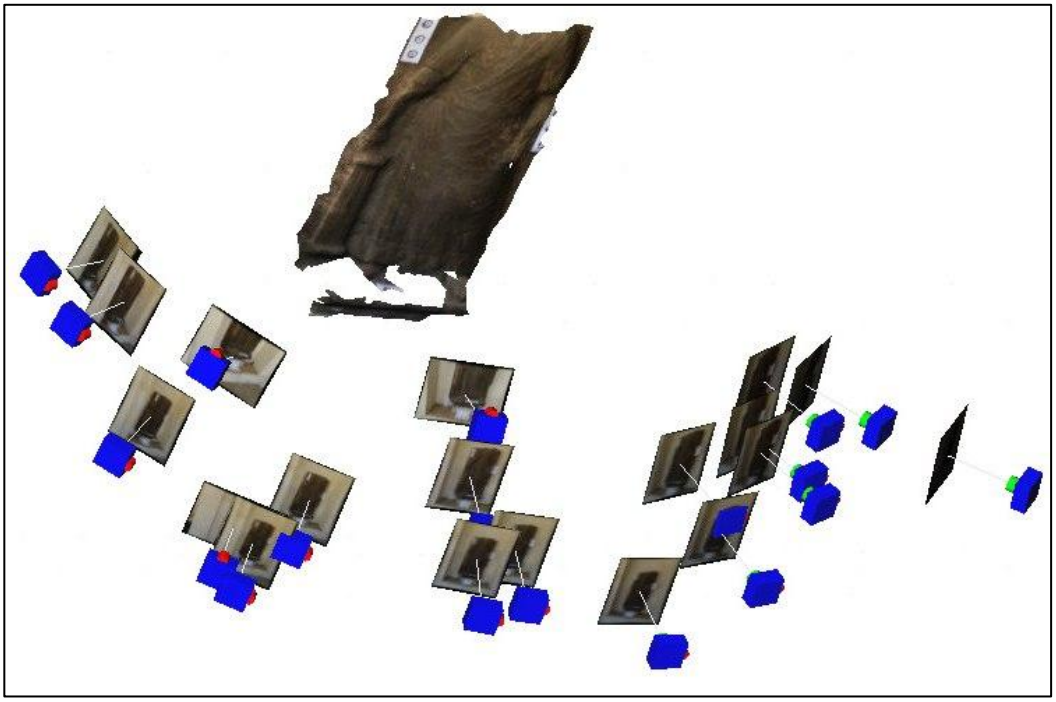
إن ما يتم التعرف عليه من الأهداف الموضحة بالشكل (4) هو فقط الدائرة المركزية أما الشكل المحيطي يساعد في تدوير الأهداف بزوايا معينة ليتم التعرف عليها في أكثر من وضع وبالتالي التحقق بشكل كامل من تحديدها بشكل مشترك بين الصور. تستخدم عادةً تقنية المطابقة المشتركة الناظمية *normalized cross-correlation* لتحديد 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 أو عند اختلاف شكل الهدف من صورة لأخرى بحسب اختلاف وضع المحور الرئيسي للحزمة الضوئية في كل صورة. تزداد صعوبة البحث عن الأهداف عندما نبحث عن موقع ذات الهدف المكرر في صورتين مختلفتين أكثر مما هي عليه في حالة البحث عن وجود هدف معياري في صورة واحدة. من أهم الطرق المستخدمة لحل هذه المشكلة طريقتي 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:

تمَّ اختيار أربعة تماثيل موجودة في المتحف الوطني بدمشق لنمذجتها وتوثيقها باستخدام تقنيات المساحة التصويرية. ممّا

ينصح به ، بشكل عام التقاط صور فائضة ومن ثم اختيار أفضلها 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 للجسم. إلا أنه يتوجب التقاط صور من مسافات أبعد ، بحث تغطي و تطوّق كامل الجسم لأنها قد تشكل مزدوجاً مع صورة تفصيلية ما لم ينجح التقاط صورتها الأخرى ، كما أنها تفيد في التكّـسية 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 مما يرفع من دقة عملية التوجيه النسبي ، إذ أن هامش الخطأ في هذا النوع من الأعمال ضئيل جداً. يبين الشكل 5 مجموع الصور التي التقطت لتمثال الكاهن والتي تمّ توجيهها نسبياً وبالتالي حساب موقع واتجاه آلة التصوير لحظة التقاط الصور. نلاحظ غياب مزدوج أو اكثر يغطي قدمي التمثال مما سيؤدي لغياب هذا الجزء في النموذج النهائي المبين في الشكل (5) أيضاً.



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

2.4 التوجيه النسبي :

من الُمسلّم به في علم المساحة التصويرية استحالة حساب إحداثيات الجسم انطلاقاً من صورة واحدة دون وجود نقاط توجيه خارجي معلومة الإحداثيات لذا تُستخدم عادةً صورتين من أجل حلّ معضلة حساب معامل المقياس. عند معرفة إحداثيات خمسة نقاط مشتركة في كل من الصورتين (على الأقل) نستطيع حساب الموقع والدوران النسبي للصورة الثانية بالنسبة

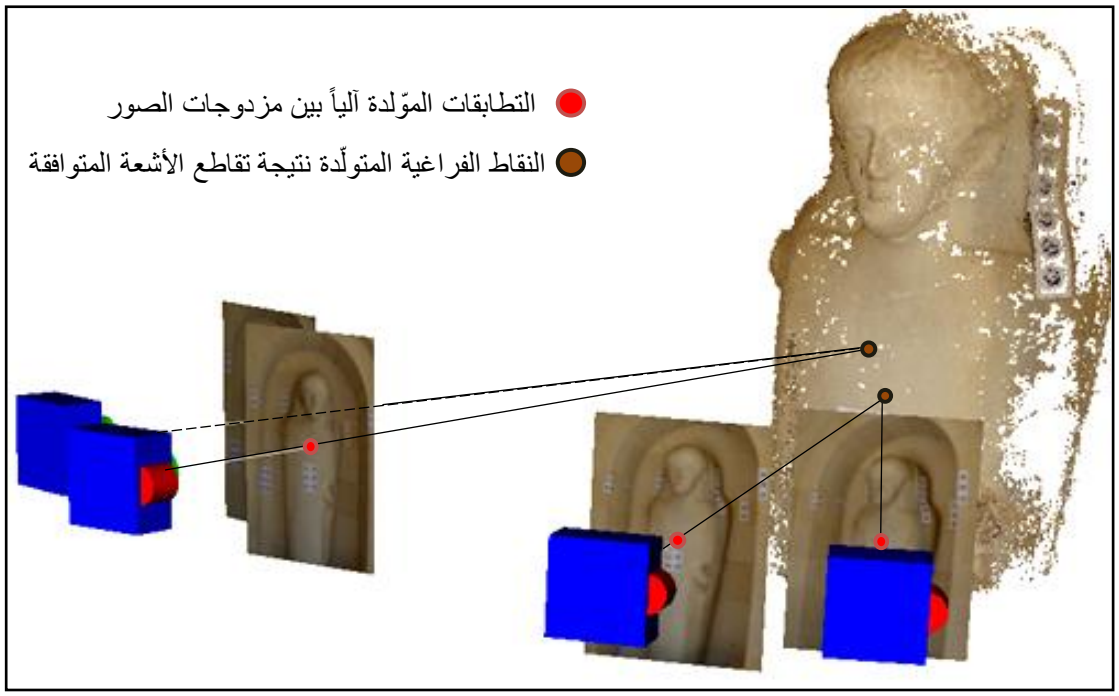
لمقابلتها الأولى. يتم توجيه الصور المتعددة سواءً باستخدام المزدوجات مثنى مثنى أو ككتلة واحدة (block) حيث تتم الاستفادة من النقاط المشتركة بين ثلاثة صور أو أكثر. أياً كانت الطريقة المستخدمة في حساب التوجيه النسبي فما يُهمّ لهذا النوع من العمل ، هو تقييم دقة العملية. لن نستخدم الصور التي تزيد دقة حساب التوجيه النسبي فيها عن بيكسلٍ واحد لأيٍ من الأهداف (النقاط المشتركة) في عمليةً توليد الغمامات النقطية. يبين الجدول (1) أدناه جزء من نتائج عملية توجيه الصور حيث يبيّن الحقل الأول يسار القارئ ، حساب أكبر راسب موجود على النقاط المقاسة على الصورة ، ويبين العمود الذي يليه الخطأ المتوسط التربيع للمجموع. كما تظهر الحقول الثلاثة الأخيرة توجيه الصور ممثلاً بزوايا أويلر Euler angles الثلاثة (κ،φ،ω) كتوجيه خارجي في جملة مفترضة من البرنامج.

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

جدول 1: جزء من نتائج عملية توجيه أحد مجموعات الصور المستخدمة في التوثيق.

2.5 توليد غمامة النقاط الكثيفة :

يتم توليد 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). يبين الشكل (6) مثال مبسّط 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 والتعرف الآلي عليها) ذلك أن عناصر التوجيه النسبي قد حُسبت بشكل دقيق مما يسمح بتوليد مئات النقاط الفراغية التي سندعوها الغمامات الجزئية. لم يتمّ إنجاز هذا الطور من المعالجة بشكل مؤتمت تماماً حيث يتدخل المستخدم في سير العملية من خلال



شكل رقم 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).

تحديده لأفضل المزدوجات ومن خلال فحصه البصري لجودة كل من الغمامات الناتجة. خضع اختيار مزدوج الصور الموجهّة خلال عملية توليد الغمامات النقطية للشروط التالية :

1. أن لا يزيد الراسب على موضع أي من النقاط المقاسة والداخلة عملية التوجيه النسبي للصورتين عن 1 بيكسل
2. أن لا تزيد نسبة القاعدة التصويرية إلى العمق "b/h" عن 0.5 وأن لا تقل عن 0.1.
3. أن لا تتجاوز الزاوية بين محوري الصورتين البصريين 20^{o}.
4. أن لا تكون الغمامة الناتجة عالية الضجيج (nois) أو تحتوي الكثير من النقاط اللامنتمية للجسم.

إنّ الشروط الثلاثة الأولى تضمن بشكلٍ لازمٍ وغير كافٍ توليد غمامات كثيفة وذات تغطية عالية للجسم ، إذ أن هذه العملية تعترضها 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 ، مما يجعل من الصعب جداً تحديد نقاط مميزة في أحد الصور ومن ثم تحديد مقابلاتها في الصورة الثانية.
3. الضعف في وصول أشعة الحزمة الضوئية لبعض التفاصيل المتراجعة (حتى وإن كانت الزاوية بين محوري الصورتين ضيّقة) وهذا ما يسمى عادة بتخبئة الجسم لنفسه (self occlusion).

إن مُجّمل الصعوبات السابقة يجعل من المفضّل تدخل المستخدم يدوياً واختياره

للغمامات الأفضل 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 للمستخدم 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 يستوجب فحص الغمامات الناتجة بصرياً بدقة وانتباه أشدّ.

2.6 إصلاح وتنظيف الغمامات الجزئية

بما أن جميع الصور قد وجّهت نسبياً بالنسبة لبعضها البعض ، فإن غمامات النقاط الجزئية يجب أن تتطابق مع بعضها البعض 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 البعض. لذا كان لابد من سلسلة عمليات متتالية بهدف إصلاح وتنظيف الغمامات الجزئية الناتجة وهي :

- الإرجاع ثلاثي الأبعاد للغمامات (أو ما يسمى بالتسجيل registration) : تهدف هذه العملية لتعريف تحويلٍ 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 (1992,Besl) هي الطريقة الأفضل والمستخدمة على أوسع نطاق لإنجاز التسجيل. بعد إتمام هذه المرحلة تُدمج جميع الغمامات الجزئية 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.

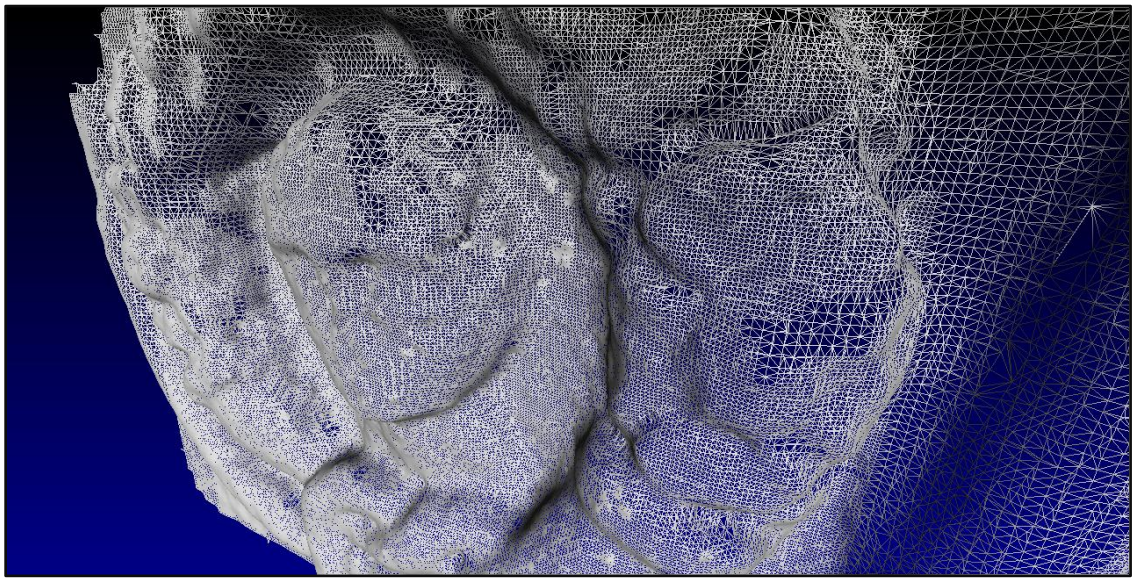
2.7 إنشاء شبكة التثليث (meshing):

على الرغم من 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 والاستفادة 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 يظل هنالك فراغات بينها وقد تكون هذه الفراغات غير منتظمة وتابعة لشروط التصوير وتوليد الغمامة.
- صعوبة توجيه السطح (داخلي - خارجي) وبالتالي 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 تعرّجات السطح. أياً كانت معاملات هذه السطوح (عدد العقد الحاكمة لها وأوزانها) فإنه من الصعب جداً أن تعبّر عن اهتراء وخشونة سطح التمثال أو اقتطاع أو انهيار أجزاءٍ منه. لقد كان خيارنا في هذا العمل إذن إنشاء شبكة تثليث (mesh) تصل بين النقاط الأساسية والمعبّرة من الغمامة لتحقيق نموذج سطوحي أكثر ملائمةً 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) والتي يقصد بها المناطق الكبيرة نسبياً الخالية من أي نقطة من نقاط الغمامة. تمّ في هذا العمل اختيار 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 لمرة أو اثنتين في المناطق الأبسط. تُعرّف في كل مكعب وظيفة ضمنية تحدد ما هي النقاط التي ستنتمي للسطح المنشود ، وما هي النقاط التي تقع داخله أو خارجه. يتم الوصل بين النقاط المنتمية لاحقاً حسب تثليث دولوني. تمّ تنفيذ هذه المرحلة بالاستعانة ببرنامج (MeshLab) (شكل 7) حيث اكتفينا بسلم من ثمانٍ (n=8) درجات متلاحقة من التقسيم (Octree) في مقاربة بواسون.



الشكل رقم 7 : التثليث المطبّق على نقاط الغمامة - يمكن ملاحظة اختلاف كثافة التثليث بحسب تعقيد الشكل أوعند وجود فجوات في البيانات.

2.8 عملية التكّسية (texture)

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

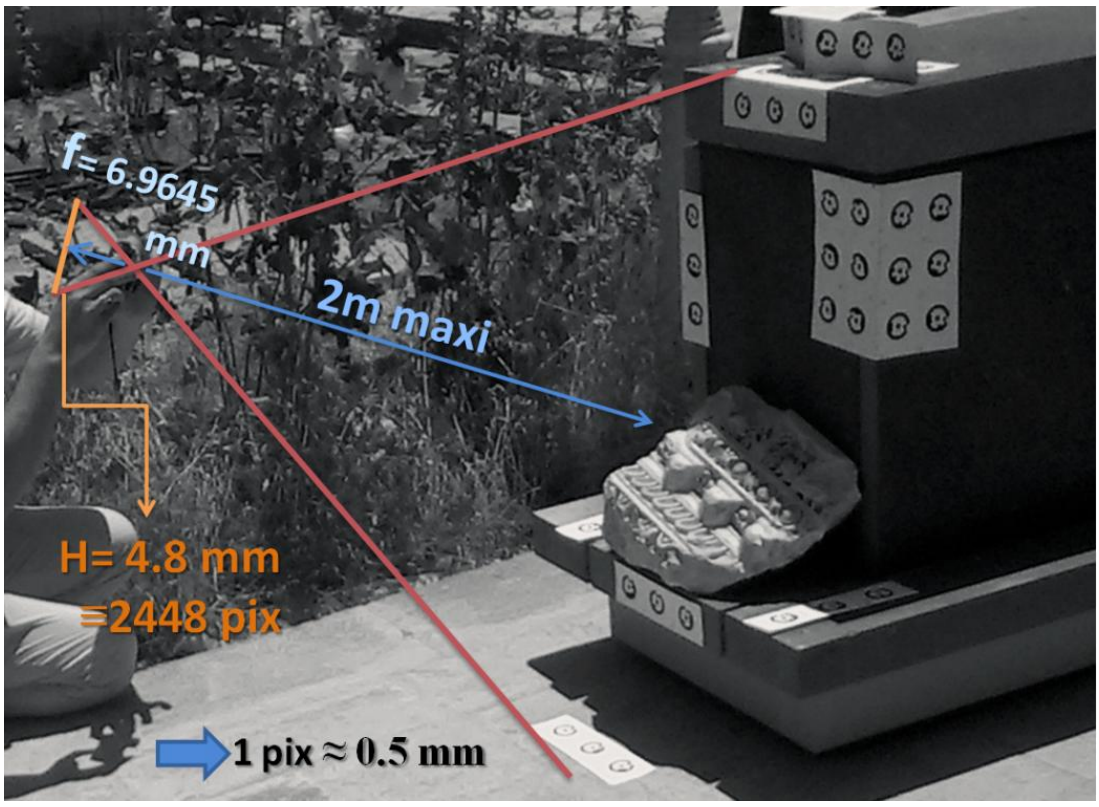
الشكل رقم 8 :صورة للنموذج النهائي ثلاثي الأبعاد المنجز لقطعة من شاهدة قبر (نحت نافر للمتوفى مع إكليل وأفعوان) - حديقة المتحف الوطني بدمشق.

تبرز هنا ضرورة أخذ تجانس الإضاءة بعين الاعتبار لدى التقاط الصور وخصوصاً بالنسبة للأوابد والتماثيل المعرّضة مباشرة لأشعة الشمس ، كي لا نحصل على أجزاء منارة وأجزاء عاتمة في نفس النموذج. الشكل (9) هو النموذج النهائي لجزء من طنف (أو إفريز) مثلث لبناء أثري ويظهر عليه تأثير الظلال غير المرغوب والذي نوصي بتجنبه حين التقاط الصور. قد يتطلب ذلك التصوير صباحاً لأحد جوانب المنشأ وثم العودة في نهاية الظهيرة مثلاً لتصوير الجانب الآخر. إن وجود الظلال في الصور الملتقطة يؤدي عادةً أيضاً لتكثيف التقاط 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.

شكل رقم 9 : الأثر الغير مرغوب للظلال في تكسّية النموذج ثلاثي الأبعاد

3. النتائج والتوصيات :

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 على الأهداف. وكان من اليسير إنجاز كل من هاتين العمليتين بدقة أقل من (1 بيكسل). وبما 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 عن (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).

قد تؤدي المبالغة في عملية التنعيم (smoothing) أثناء بناء النموذج السطوحي المثلثاتي إلى انحدار الدقة بشكل واضح ولا سبيل لتقدير الخطأ المترافق مع هذه العملية. لذا فإننا نوصي بإنجاز هذه العملية بشكل تدريجي وبعدد دورات (iteration) محدود ومراقب. إن العناية بتحضير العمل كإلصاق الأهداف بشكل ثابت لا يتحرك بفعل الرياح أو حرارة الجوّ يزيل احتمال الخطأ بتحديد هذه الأهداف آلياً ويضمن نجاح عملية التوجيه النسبي.

4. خاتمة

إن التجارب المقدّمة في هذه الورقة لم تتعدَّ مبادرةً بسيطةً على المستوى الشخصي وبمساعدةٍ كريمةٍ من مدير ومسؤوليّ المتحف الوطني بدمشق. 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 كافة الاتجاهات. نأمل بأن تساهم الدراسة المقدّمة في تبني 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 وتقييم النتائج.

إن وجود النماذج الرقمية للمنشآت وتوثيقها واعتمادها هو أساس لعملية الترميم والاسترجاع في حالة تخريب أو فقد القطعة الأثرية . لذا نوصي باعتماد هذه التقنية وتعميمها على الجهات المعنيّة وعلى طلاب الهندسة المعمارية والآثار والمتاحف من أجل رقمنة أكبر قدر ممكن من التراث الوطني وخاصة في ظل الظروف التي يتعرض لها القطر والتخريب المتعمد لموروثه الثقافي.

المراجع:

د.فايز ديب.- د.عمر الخليل, توثيق المنشآت الأثرية باستخدام النمذجة ثلاثية الأبعاد متعددة الصور. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الثامن والعشرون - العدد الثاني 2012 -

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

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

Kazhdan, M. Reconstruction of Solid Models from Oriented Point Sets 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 reference: PhotoModeler Online Tutorials:www.photomodeler.com/tutorial-vids/online-tutorials.htm

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
Iteration	دورة
Mesh	شبكة تثليث
Normalized cross correlation	المطابقة المشتركة الناظمية
Nurbs: Non-uniform rational B-spline	المنحنيات غير المنتظمة
Octree	تقسيم بثمان مستويات عمق
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

3D modeling of archaeological pieces using photogrammetry

Majd ALSHAWA*

Abstract:

Close range photogrammetry becomes one of the most effective way for digital documentation of culture heritage, especially with the popularity of digital cameras and related software. Nevertheless, this risks yielding erroneous results if the 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 statues of the national museum of Damascus using the technique close range photogrammetry. 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 as the planning of photo acquisition session. Final model is verified according to the indexes of the accuracy of archeological modeling.

Key words:

Documentation - close range photogrammetry - image matching - modeling - triangulation.

* Instructor - Damascus university- faculty of civil engineering - department of topography