تطبيق نظام مسح تصويري قليل التكاليف في النمذجة ثلاثية الأبعاد للبنى المعمارية واللقى الأثرية

د. عمر الخليل[1] و د. عبد الرزاق عجاج[2]

الملخّص

تتمتع النماذج ثلاثية الأبعاد للقى الأثرية (مثل التماثيل) وللبنى المعمارية بأهمية قصوى عند دراسة هذه اللقى والبنى وتحليلها وإعادة بنائها وتوثيقها. كما يعطي الإظهار الخاص بهذه النماذج للمستخدم انطباعاً صورياً حقيقياً عن هذه اللقى والبنى بدلاً من التعبير عنها باستخدام الرسوم. إنّ للإظهار ثلاثي الأبعاد العديد من التطبيقات في مجال الآثار، وتاريخ الفن، والعمارة، والهندسة المدنية، والسياحة،...الخ.

يعدّ المسح الحقلي التقليدي للبنى المعمارية أفضل من المسح التصويري من ناحية الدقة. وفيما يخص اللقى الأثرية، فإنّ المسح الليزري ثلاثي الأبعاد يعدّ الحل الأمثل نظراً إلى الكثافة العالية للنقاط الممسوحة بشكل آلي. ولكن هذه الحلول مكلفة من ناحية الوقت والاحتياجات. ولذلك اقترح في هذه المقالة استخدام نظام مسح تصويري قليل التكاليف في النمذجة والإظهار ثلاثي الأبعاد الدقيقين للقى الأثرية وللأبنية. هذا النظام مكون من آلة تصوير رقمية عادية غير مخصصة للمسح التصويري، ومعطيات ضبط بسيطة ومن برنامج لتوجيه الصور والنمذجة. إنَّ الاستخدام الفعّال لهذا النظام يتطلب تطبيق مجموعة من القواعد البسيطة المشروحة في متن البحث.

الكلمات المفتاحية: آلة تصوير رقمية، نمذجة ثلاثية الأبعاد، معايرة آلة التصوير، توجيه الصور.

[1] أستاذ مساعد، قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.
[2] أستاذ مساعد، قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، سورية.

Application of a low cost photogrammetric system in 3D modeling of architectural structures and archaeological finds

Dr. Omar Al khalil[(1)] and Dr. Abdulrazzak Ajaj[(2)]

Abstract

3D models of archaeological finds (such as statues) and architectural structures are very important in order to study, analyze and also to reconstruct and document these finds and structures. The visualization of these models allows the user to get the photo realistic impression for these finds and structures rather than graphics-based presentation. 3D visualization has many applications in the field of archeology, art history, architecture, civil engineering, tourism, etc.

From precision point of view, traditional field survey of architectural structures is better than photogrammetric documentation. With regard to archaeological finds, 3D laser scanning is the perfect solution because of the high density of scanned points. But these solutions are expensive in terms of time and needs. Therefore, we propose in this study the use of a low cost photogrammetric system for precise 3D modeling and visualization of archaeological finds (such as statues) and buildings. This system is composed of an ordinary digital camera (not designed for photogrammetric purposes), simple control data and a software for orientation and modeling. The effective use of this system require the application of some simple rules which are presented in this study.

Key words: Digital camera, 3D modeling, Camera calibration, Photos orientation.

[(1)]Assist., Prof. Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

[(2)]Assist., Prof. Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Damascus University, Syria.

1-المقدّمة

في الوقت الحاضر، هناك طلب متزايد على البيانات ثلاثيـة الأبعـاد لأغـراض التوثيـق والتخطـيط والعمـارة، والتحليل البيئي، والسياحة.. الخ (LERMA, J. L, GARCIA A, 2004). هذا، وتتوافر عدة تقنيات للحصول علـى هـذا النـوع مـن البيانـات منهـا الرفـع الطبـوغرافي التقليدي،و المسح التصويري والمسح الليزري ثلاثي الأبعاد 3D laser scanning. يعدّ المسح الطبوغرافي التقليدي أدق تقنيات الحصول على البيانات ثلاثية الأبعاد، لكنَّه يتطلب استخدام تجهيزات خاصة ومرتفعة التكاليف فضلاً عن الخبرة الخاصة والوقت الطويل. أمَّا فيما يخص المسح الليـزري ثلاثـي الأبعـاد، فإنَّـه تقنيـة سـريعة جـداً (مقارنـة بالمسح التقليدي) ودقيقة ولكنها تعاني من مجموعة من المشكلات نذكر منها الكلفة المرتفعة جداً لأجهزة المسح، والخبرة والحاجة إلى معالجة لاحقة للبيانات بهدف تصنيف نقاط المسح وذلك لأنَّ هذا المسح يولّد غمامة من النقاط العمياء التي لا تعرف إلا مواقعها. من هذا المنطلق، يمكن عدّ المساحة التصويرية حلّاً وسطاً بين التقنيتين السابقتين فهو حل أسرع من المسح الطبوغرافي وأقلُّ كلفة منه ومن المسح الليزري (KOEVA,M, 2004).

إنَّ مصطلح المساحة التصويرية القريبة Close range photogrammetry يعني الحصول على معلومات كمّية (إحداثيات، أطوال، مساحات، حجوم..) تخصُّ عنصراً ما انطلاقاً من القياسات التي تجري على صور هذا العنصر والملتقطة عن مسافة تراوح من ثلاثة إلى مئة متر عن هذا العنصر. هذا، ويمكن تعريف نظام المسح التصويري الرقمي Digital photogrammetry system المتكامل بأنَّه مجموعة من الأدوات والبرامج التي تسمح بالحصول على منتجات المسح التصويري من صور رقمية باستخدام تقنيات قياس يدويَّة أو آليَّة. تنقسم هذه النظم إلى نوعين عـامين: احترافيـة وتجاريـة. فعنـدما يتعلـق الأمـرُ بالدقَّـة العالية، نلجأ إلى استخدام النظم الاحترافية التي تستخدم آلات تصـوير مترية مـع بـرامج متطـورة قائمـة علـى أسـس المسـاحة التصـويرية التجسـيمية Stereoscopic photogrammetry. إنَّ هذا النوع من النظم مرتفع التكاليف، كما أنَّه يتطلب متخصصين في المساحة التصويرية لتشغيله. أمَّا عندما يتعلق الأمر بتطبيقات ذات دقَّة متوسطة، فإنَّه من الممكن استخدام النظم التجارية قليلة التكاليف للحصول على البيانات ثلاثية الأبعاد. إنَّ هذا النوع من النظم له تطبيقات مهمة جداً في مجال توثيق التراث المعماري، ونمذجة اللقى الأثرية، ونمذجة الأبنية، وتاريخ الفن، ..الخ. وهي نظم لا تحتاج إلى متخصصين لتشغيلها وهي مكونة من: آلة تصوير رقمية، وبرنامج لتوجيه الصور وتوليد النماذج الصورية الواقعية منها فضلاً عن بيانات ضبط Control data بسيطة مثل المسافات الأفقية والشاقولية المقيسة على العنصر المصور. يتطلب استثمار هذا النوع من النظم بشكل جيد تطبيق مجموعة من القواعد البسيطة (هندسية، صورية وتنظيمية) (WALDHAUSL P, OGLEBY C. 1994) التي يمكن للعديد من غير المتخصصين تطبيقها دون صعوبة كبيرة. كمانجد في(EL-HAKIM,S *et al.*, 2005) عرضاً لمختلف تقنيات إنتاج النماذج ثلاثية الأبعاد من الصور مبيناً حسنات تقنيات المسح التصويري بالنسبة إلى تلك القائمة على استخدام نظم التصميم بمعونة الحاسب CAD. قمنا في هذا البحث بتجربة لاختبار دقة النماذج ثلاثية الأبعاد المنتجة باستخدام تقنية المسح التصويري. في هذه التجربة، طبقّت القواعد البسيطة المعطاة في (WALDHAUSL P, OGLEBY C. 1994) وباستخدام نظام مسح تصويري تجاري قليل التكاليف في الحصول على النموذج ثلاثي الأبعاد لنسخة مقلّدة من تمثال أثري (تمثال كسرى) ذي البنية الهندسية المعقّدة وعلى النموذج ثلاثي الأبعاد لأحد الأبنية ذات الهندسية البسيطة نسبياً.

العنصر الذي سننمذجه هو ماكيت يمثل بناءً بمقياس $\frac{1}{50}$ وهو منجز من قبل طلاب المعهد التقاني الهندسي في جامعة تشرين.

2- أهمية البحث وأهدافه

تظهر أهمية البحث الحالي في أنَّه يتيح لنا اختبار فعالية النمذجة ثلاثية الأبعاد ودقتها للعناصر الصغيرة (اللقى الأثرية) وللعناصر المعمارية انطلاقاً من صورها، وذلك بتطبيق قواعد بسيطة تتعلق بتحضير معطيات الضبط، بعملية التصوير وبتنظيم عملية المسح التصويري كلّها. إنَّ الأهداف التي يسعى البحث لتحقيقها هي الآتية:

1. توضيح فعالية نظم المسح التصويري التجارية قليلة التكاليف في النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر ذات الهندسيات المتنوعة (من البسيطة إلى المعقّدة).
2. توجيه اهتمام العاملين في مختلف المجالات التي تتعامل مع المعلومات ثلاثية الأبعاد إلى التعامل مع

الجيل الجديد من آلات التصوير الرقمية ذات دقة التمييز المتوسطة والمرتفعة ومع برامج توجيه الصور والنمذجة منها. إنَّ هذا النوع من البرامج أصبح يتمتع الآن بإمكانيات هائلة تتعلق بأتمتة القياسات والتعامل مع مختلف أنواع السطوح والأشكال ثلاثية الأبعاد، فضلاً عن تعامله مع آلات تصوير رقمية معايرة وغير معايرة على حدٍّ سواء.

3. إعطاء تطبيق عملي لقواعد المسح التصويري لغير المختصين في المساحة التصويرية.

3- مواد البحث وطرائقه

3-1- آلات التصوير الرقمية المستخدمة

مع أنَّ آلات التصوير الرقمية (المستقلة أو المرفقة مع الهواتف الذكية) لم تصمم لأغراض المسح التصويري، إلا أنَّها تمتلك العديد من الميزات العملية، مقارنةً بمقابلتها التي تعتمد على الأفلام، لذلك فهي تقدم نفسها كأداة رقمية قوية وواعدة في مجال المسح التصويري. إنّ استخدام هذا النوع من آلات التصوير كأداة للحصول على المعلومات المترية يمكّن من تخطي مرحلة المسح الضوئي للأفلام ومن أتمتة العديد من عمليات القياس على الصور. وبالنسبة إلى آلات التصوير المستخدمة في بحثنا فهي (الشكل1):

1. آلة التصوير الرقمية المرفقة مع الهاتف النقال Samsung GT-18262 وهي آلة تصوير رقمية تتمتع بدقة تمييز هندسية تصل حتى 5 ميغابكسل، تتمتع هذه الآلة بمواصفات صورية جيدة مع إمكانيات الفلاش والتركيز الآلي، وهي مزودة ببصريات مصنعة من قبل Carl Zeiss.
2. آلة التصوير الرقمية المستقلة CasioExilim EX-H10، ذات دقة تمييز هندسية أعظمية تصل حتى 12 ميغابكسل.

الشكل (1) آلات التصوير الرقمية المستخدمة في البحث.

3-2- العناصر التي نود نمذجتها

أنتجت في هذه الدراسة النماذج ثلاثية الأبعاد للعنصرين الآتيين (الشكل2):

1. نسخة مقلّدة من تمثال أثري (تمثال كسرى). الهدف من استخدام هذا العنصر هو تبيين قدرات الصور الملتقطة باستخدام آلة تصوير الهاتف النقال كمدخل أساسي في استنتاج الهندسية المعقّدة لهذا النوع من العناصر. في الواقع، هذا العنصر مؤلف من سطوح ثلاثية الأبعاد غاية في التعقيد من وجهة نظر هندسية (سطوح محدّبة، ومقعرة وأسطوانية الشكل).
2. ماكيت لأحد الأبنية الحديثة بمقياس $\frac{1}{50}$ وهو منجز من قبل طلاب المعهد التقاني الهندسي في جامعة تشرين. هذا البناء مكوَّن من سطوح مستوية أفقية، وشاقولية ومائلة وهو ذو بنية هندسية بسيطة مقارنةً بتمثال كسرى.

الشكل (2) العناصر المنمذجة.

3-3- الصور اللازمة للنمذجة

طبّق أسلوب الصور المتعددة Multi - images Approach في التقاط الصور اللازمة لنمذجة العناصر المدروسة. إن إستراتيجية التقاط الصور هنا هي أنّ كل نقطة مطلوب تحديدها يجب أن تكون واقعة على تقاطع شعاعين مارين بمرتسمات هذه النقطة على صورتين على الأقل بزاوية مقبولة بحيث يمكن تحديد موقعها في العنصر بالتقاطع الفراغي. وتعتمد هذه الزاوية على متطلبات الدقة فقط. إنَّ معرفتنا بالطبيعة الهندسية للعنصر المصور (وجود خطوط متوازية، وقوع بعض السطوح في المستوي نفسه وتعامد بعض العناصر في فراغ العنصر) سيمكننا من زيادة القياسات الداخلة في الحسابات، وهذا سيسمح بالحصول على حل قوي ومتجانس يحدد هندسية العنصر

من خلال القياسات المنفذة على الصور (COOPER M.A.R., ROBSON S.1996)

بالنسبة إلى تمثال كسرى، فقد التقطت صوره باستخدام آلة التصوير الرقمية المرفقة مع الهاتف النقّال Samsung GT-18262. أمّا صور الماكيت فقد التقطت باستخدام آلة التصوير الرقمية Casio.

3-4- برنامج النمذجة

فيما يخص معايرة آلة التصوير،و حساب توجيهات الصور وحساب النموذج ثلاثي الأبعاد فقد استخدّم البرنامج Photo Modeler Pro.6. هذا البرنامج مطوَّر من قبل الشركة الكندية EosSystems يعمل بنظام Windows. يستخدم هذا البرنامج مفهوم المشروع الذي يقوم على المعطيات الآتية: الصور، وآلة التصوير المستخدمة في الحصول على الصور والقياسات على الصور. كما يمكّن من معايرة آلة التصوير للحصول على مواصفاتها الهندسية الداخلية (معاملات التوجيه الداخلي) الدقيقة (Eos Systems. 2008). إذ يمكن، في هذه الحالة، حساب البعد المحرقي للجهاز المستخدم والنقطة الرئيسية للصورة وتزيّغات العدسة.

يجري القياس على الصور المظهرة على الشاشة ويقوم البرنامج بحساب البنية ثلاثية الأبعاد للمشهد المصور. ويمكن تصديرها على شكل ملف رسومي يمكن التعامل معه ضمن أيٍّ نظام تصميم بمعونة الحاسب. كما يمكن توليد نماذج صورية حقيقية للعنصر موضوع النمذجة. ويمكنّنا البرنامج من قياس النقاط،و المستقيمات،و السطوح ثلاثية الأبعاد والأسطوانات.

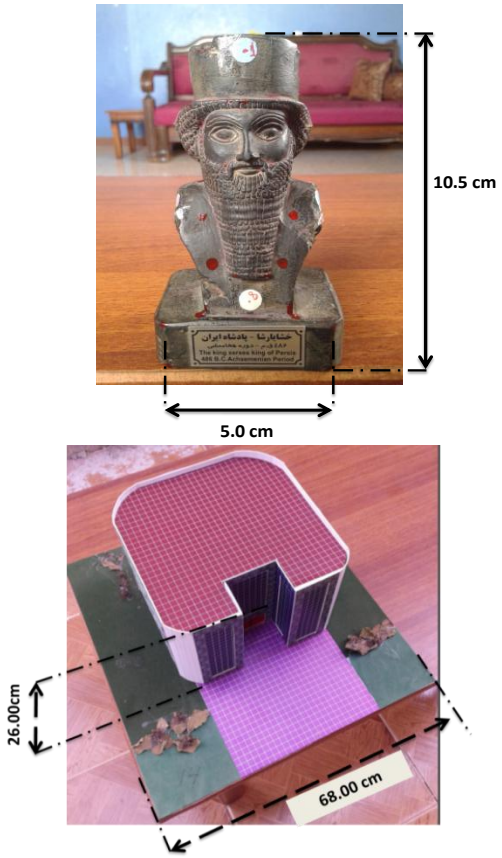
4- النتائج والمناقشة

في هذا البحث، قسّم العمل إلى المراحل الآتية:

1. الحصول على بيانات الضبط Control data.
2. التقاط الصور للعناصر المدروسة.
3. معايرة آلات التصوير المستخدمة والحصول على معاملات التوجيه الداخلي.
4. إنجاز عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر.
5. تنفيذ قياسات على النماذج الناتجة السابقة، و مقارنتها بقياسات حقيقية منفذة على العناصر نفسها.

4-1- بيانات الضبط

للحصول على بيانات الضبط، طبّقت بعض القواعد البسيطة المعطاة في (WALDHAUSL P, OGLEBY C. 1994) إذ قيست أولاً بعض المسافات الأفقية والشاقولية على العناصر، وذلك بهدف وضع النماذج على المقياس. الشكل (3) يوضّح هذه البيانات:

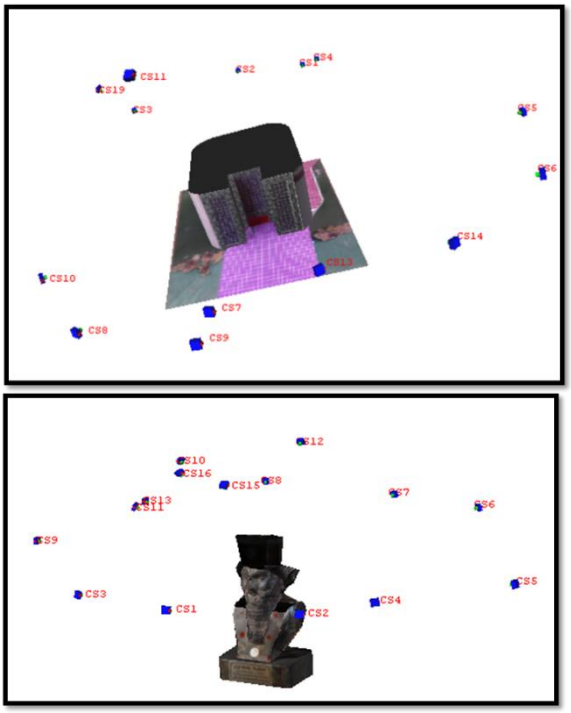


الشكل (3) بيانات الضبط.

4-2- التقاط الصور

حرصنا على التقاط هذه الصور على شكل حلقة حول العنصر مع نسبة تداخل بين الصور المتتالية تقارب 60% على الأقل. إنَّ هذا سيضمن وجود كل نقطة من نقاط العنصر على أكثر من صورتين. كما التقطت صور تغطي الأجزاء المتجاورة من العناصر. خلال التقاط الصور ثبّت الجزء البصري للآلات أي لم نستخدم التكبير والتصغير أو التركيز الآلي Auto focus. عند التقاط الصور حرصنا على العمل في شروط إضاءة متجانسة لتفادي تأثير الظلال.

احتجنا في حالة الماكيت إلى 15 صورة لتغطية أجزائه كلّها. أمَّا في حالة التمثال، فقد احتجنا إلى 17 صورة وذلك مع أنّه صغير الحجم مقارنةً بالماكيت. إنَّ هذا العدد الكبير من الصور مبرر بالتعقيد الهندسي لأجزاء التمثال (الشكل4).



الشكل (4) مواقع الصور اللازمة للنمذجة.

4-3- معايرة آلات التصوير

تحوي معظم البرامج (ومنها البرنامج المستخدم في البحث) على آلية تضمن القيام بمعايرة آلة التصوير المستخدمة (تحديد معاملات توجيهها الداخلي وتزيغات العدسة). إنَّ عملية المعايرة ضرورية من أجل الحصول على نموذج ثلاثي الأبعاد دقيق. طبعت شبكة معايرة على لوحة من القياس A0 على حامل بلاستيكي مقاوم للتمدد والتقلص ومن ثمَّ تمَّ التقطت 12 صورة لهذه الشبكة كي يقوم برنامج المعايرة بإنجاز المعايرة آلياً.

نبيّن في الجدول (1)، معاملات المعايرة لآلتي التصوير المستخدمتين في البحث:

الجدول (1) المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقّال Samsung GT-18262 ولآلة التصوير الرقمية Casio.

المعامل	Samsung GT-18262	Casio
البعد المحرقي	3.1637 mm	6.1754 mm
X_p	1.6835 mm	2.9193 mm
Y_p	1.2834 mm	2.2950 mm
K1	-1.0200E-02	5.792e-003
K2	-2.3490e-004	-1.108e-004
K3	2.300e-005	0.000e+000
P1	1.6920e-004	3.426e-004
P2	-2.7960e-004	-2.004e-004

نلاحظ من الجدول السابق أنَّ النوعية البصرية لعدسات آلة التصوير الرقمية Casio أفضل من تلك الخاصة بالهاتف النقال، وذلك من خلال مقارنة معاملات تزيُّغ العدسة الخاصة بكل منهما k3 على سبيل المثال. على كلٍّ، يمكن عدّ أنَّ تأثير هذه القيم في الدقَّة النهائية للنموذج ثلاثي الأبعاد محدود (الخليل، عمر، 2011).

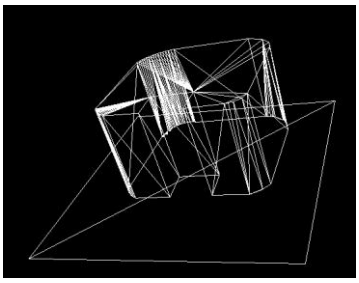
4-4- توليد النموذج ثلاثي الأبعاد

لإنجاز عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد نحتاج إلى المدخلات الآتية: مجموعة الصور الخاصة بالعنصر،و ملف معايرة آلة التصوير، وقياسات على الصور من أجل إنجاز توجيه الصور (توجيه خارجي)، وبعض القياسات المرجعية (مسافات أفقية وشاقولية) لوضع النموذج على المقياس.

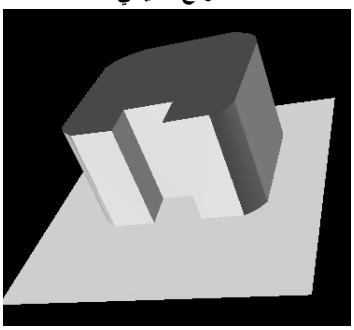
أمَّا مراحل عملية المعالجة فهي تقوم على تنفيذ قياسات على الصور الموجهة لتعريف المركبات الهندسية الأساسية للعنصر المنمذج، وتوليد النموذج الخيطي Wireframe model للعنصر. تتبع هذه الخطوة عملية توليد النموذج الحجومي أو السطوحي Surfaces model للعنصر، ومن ثمّ توليد النموذج الصوري الحقيقي Photorealistic model وذلك بإعادة إسقاط الصور الأصلية على أجزاء النموذج الحجومي (GRUSSENMEYER, P *et al.*, 2001).

فيما يخص ماكيت البناء ذي الهندسية البسيطة، احتجنا إلى عدد محدود من الصور (مع أنّ أبعاده كبيرة مقارنةً بالتمثال)، ذلك لأنَّ المكوِّن الهندسي الأساسي لبنيته هي المستويات ثلاثية الأبعاد التي احتجنا فقط لتحديد محيطها الخارجي على الصور الموجهة. في هذا المثال قسنا ما مقداره 302 نقطة على الصور بهدف التوجيه والنمذجة.من جهة أخرى، ساعدتنا دقة التمييز العالية لصور هذا العنصر على إنجاز قياسات دقيقة عليها. نبيّن

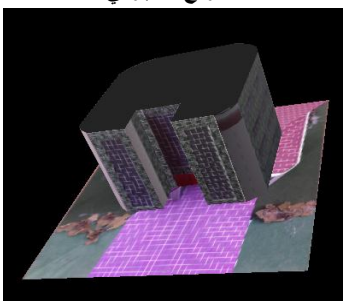
في الشكل(5) مراحل بناء النموذج الصوري ثلاثي الأبعاد للماكيت. أمّا في حالة التمثال ذي الهندسية المعقّدة، فقد احتجنا إلى عددٍ كبير من الصور (مع أنّ أبعاده صغيرة) لتغطية أجزائه المختلفة. في الواقع، لا يوجد لهذا التمثال مركَّب أساسي واحد ولكن توجد مركبات مختلفة منها المستويات والسطوح المنحنية والأسطوانات. إنَّ هذا التركيب الهندسي دفعنا إلى قياس عدد كبير جداً من النقاط على الصور لتعريف المركبات الهندسية. على هذا المثال قيس ما مقداره 340 نقطة على الصور بهدف التوجيه والنمذجة. ولابدَّ أن نشير هنا إلى إفادتنا من الإمكانيات الهائلة لبرامج النمذجة التجارية قليلة التكاليف (ومنها البرنامج المستخدم في بحثنا) وذلك فيما يخص الحالات المتنوعة لنمذجة السطوح المعقّدة والأسطوانات وغيرها. نبين في الشكل (6) مراحل بناء النموذج الصوري ثلاثي الأبعاد لتمثال كسرى.



النموذج الخيطي



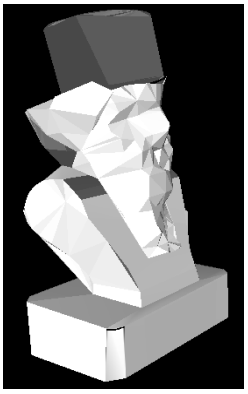
النموذج الحجومي



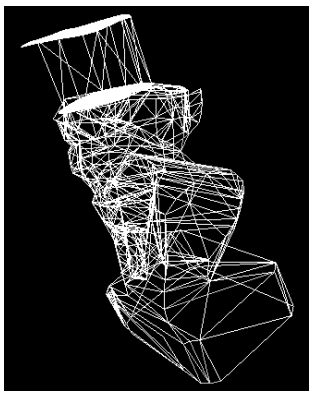
النموذج الصوري الحقيقي

الشكل (5) مراحل بناء النموذج ثلاثي الأبعاد للماكيت.

النموذج الصوري الحقيقي



النموذج الحجومي

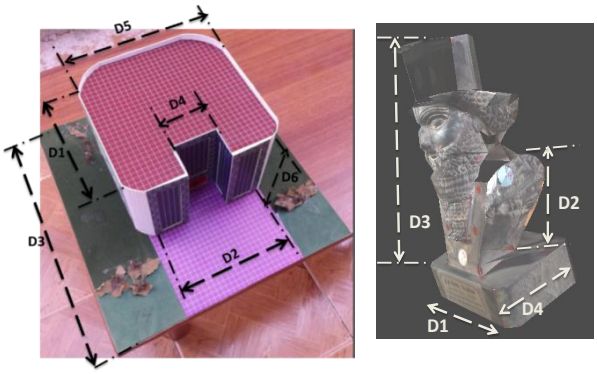


النموذج الخيطي

الشكل (6) مراحل بناء النموذج ثلاثي الأبعاد لتمثال كسرى.

4-5- تقييم دقة النماذج ثلاثية الأبعاد

استخدمت المسافات المرجعية السابقة (الشكل 3) لوضع النماذج على المقياس، ومن ثمَّ أجري عدد من القياسات لمسافات على هذه النماذج وقورنت بقيمها الحقيقية المقيسة على العنصر باستخدام مسطرة معدنية مقسّمة بشكل دقيق. والهدف هنا تبيين تأثير دقة تمييز آلَّة التصوير ومعايرتها، وكذلك تعقيد هندسية العنصر على دقة النموذج. نبيّن في الشكل (7) المسافات التي استخدمت في المقارنة في كلا النموذجين. أمَّا في الجدولين (2) و(3) فنبيّن نتائج المقارنة.



الشكل (7) المسافات المقيسة على النماذج للمقارنة.

الجدول (2) الفروق بين المسافات المقيسة والحقيقية في حالة الماكيت.

المسافة	المسافة الحقيقية(m)	المسافة المقيسة (m)	الفرق (m)
D1	0.260	0.263	0.003
D2	0.320	0.317	-0.003
D3	0.700	0.704	0.004
D4	0.120	0.116	-0.004
D5	0.400	0.399	-0.001
D6	0.260	0.258	-0.002

نلاحظ من الجدول أنّ الفروقات بين المسافات المقيسة على النموذج والمسافات الحقيقية المقيسة على العنصر هي عموماً من الفئة نفسها وذلك لأنَّ العناصر المقيسة هي مستقيمات محدَّدة وواضحة بشكل جيد على النموذج الناتج. إضافة إلى وضوح الصور (دقَّة تمييز عالية) واستخدام آلة تصوير معايرة. لاشك أنَّ مسافات مثل D3 و D4 فيها فروقات كبيرة نسبياً، ولكن ذلك يرجع إلى بعض التلف الذي يعاني منه العنصر المنمذج (الماكيت) الناتج عن عملية التخزين في شروط سيئة. إنَّ هذه المشكلة جعلت قياس هذه المسافات على العنصر صعباً بعض الشيء.

الجدول (3) الفروق بين المسافات المقيسة والحقيقية في حالة التمثال.

المسافة	المسافة الحقيقية(cm)	المسافة المقيسة (cm)	الفرق (cm)
D1	5.00	5.09	0.09
D2	5.60	5.48	-0.12
D3	8.90	8.74	-0.16
D4	3.10	3.09	-0.01

نلاحظ من الجدول السابق أنَّ قيم الفروقات ازدادت حسب الطبيعة الهندسية للعنصر المقيس. فمثلاً، عند قياس المسافات D1 و D4 قيست مستقيمات واضحة على النموذج، وهذا ما يبرِّر الفروق القليلة نسبياً. أمَّا المسافات D2 و D3 فهي مسافات تخص مركبات معقّدة هندسياً (سطوح منحنية وأسطوانة مائلة) وهذا ما جعل الفروق بينها وبين المسافات الحقيقية كبيراً نسبياً. إنَّ هذه الفروق الكبيرة تعبّر عن أمرين أولهما صعوبة القياس على النموذج، وثانيهما تأثير نمذجة المكوِّنات المعقّدة باستخدام نقاط فقط مقيسه على الصور. يمكن أن نضيف دقة التمييز المنخفضة للصور (مقارنةً بصور الهاتف النقّال) وعدم وضوح حدود بعض الأشكال في التمثال الأصلي، وهذا ما جعل قياسها على الصور صعباً.

5- الاستنتاجات والتوصيات

انطلاقاً من الدراسة السابقة، نستنتج أنَّه:

- من الممكن استخدام الصور الملتقطة بآلات تصوير رقمية غير مخصصة للمسح التصويري، وذلك من أجل توليد نماذج ثلاثية الأبعاد للعناصر.
- من الممكن تطبيق بعض القواعد البسيطة المقترحة لغير المتخصصين من أجل الحصول على أفضل نمذجة ممكنة من ناحية الدقة وقلة الكلفة.
- نستنتج أنَّه من الممكن تنفيذ نمذجة كاملة هندسياً وصورياً باستخدام برامج نمذجة تجارية قليلة الكلفة (من ناحية السعر والتشغيل) تعمل على حواسب شخصية، وتتمتع بقدرات معالجة عالية وواعدة.
- وجدنا أنَّ دقة النموذج الناتج تعتمد على دقَّة تمييز الصور من ناحية، وعلى التعقيد الهندسي للعنصر المنمذج.
- مما سبق، وجدنا أيضاً أنَّه من غير الممكن استخدام هذا النوع من النماذج في الحصول على قياسات عالية الدقة، ولكن من الممكن له أن يلبي احتياجات كثير من المعماريين أو الآثاريين لأغراض الإظهار والحركية Animation للعناصر.

التوصيات

نوصي باستخدام آلات تصوير الرقمية (المستقلة أو المرفقة مع الهواتف النقالة) بعد معايرتها في تطبيقات المسح التصويري القريب التي لا تتطلب دقة عالية جداً. كما نوصي باختيار آلة التصوير التي تمكِّننا من الحصول على دقة تمييز عالية (5 ميغابكسل أو أكثر) في حالات العناصر المعقّدة هندسياً. وفي هذه الحالة نوصي أيضاً بزيادة عدد الصور (ما أمكن) لأخذ الأجزاء الهندسية كلّها بالحسبان.

References المراجع

[1]LERMA, J. L.,Garcia, A. 2004. ***3D city modeling and visualization of historic centers*****, Int workshop on vision techniques applied to the rehabilitation of city centre's, 25-27 oct, Lisbon, Portugal**

[2]KOEVA, M. 2004. ***3D realistic modeling and visualization of buildings in urban areas*****, Int sym on Modern technologies, technologies, education and professional practice in geodesy and related fields, Sofia, 04-05 November.**

[3]El-Hakim, S, ***et al.*****, 2005.** ***3D reconstruction of complex architectures from multiple data, ISPRS Int. Workshop on 3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures*** **(3D-Arch 2005), August 22-24, Venice-Mestre, Italy.**

[4]Waldhausl P, Ogle by 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.**

[5]Cooper M. A. R., Robson S. 1996. Theory of close range photogrammetry. In Close range photogrammetry and machine vision. ed. by K. B. Atkinson. Department of Photogrammetry and Surveying. University College London, 1996, 13.

[6]EOS Systems Inc. 2008. Photo modeler Pro 6 Help.

[7]Grussenmeyer, P., Hanke, K., Streilein, A. Applications métrologiques de la photogrammétrie numérique. In Photogrammétrie numérique, Paris: LAVOISIER, 2001, 317-361.

[8] الخليـل، عمـر. 2011. التحقـق مـن اسـتخدام آلات التصـوير المرفقـة مـع الهواتـف النقالـة فـي النمذجـة. مجلـة جامعـة تشـرين للعلوم الهندسية.2011.

Received	2015/12/09	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/03/01	قبول البحث للنشر