

التحقق من استخدام آلات تصوير الهواتف النقالة في النمذجة

الدكتور عمر الخليل*

(تاريخ الإيداع 28 / 2 / 2011. قُبِلَ للنشر في 4 / 5 / 2011)

□ ملخص □

تملك معظم الهواتف النقالة الحديثة آلات تصوير رقمية داخلية ذات دقة تمييز عالية. وهذا يشجعنا على استخدامها في تطبيقات المساحة التصويرية الرقمية القريبة وذلك بعد معايرتها بهدف تحديد معاملات توجيهها الداخلي. تم في هذا البحث دراسة حدود استخدام مثل هذا النوع من آلات التصوير في النمذجة ثلاثية الأبعاد انطلاقاً من الصور الرقمية. حيث تم استخدام آلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقال Nokia 6500 في التقاط صور استخدمت في حساب النموذج ثلاثي الأبعاد لعنصر صغير. وآلة التصوير هذه رقمية و دقة تمييزها العظمى تبلغ 3.2 ميغابكسل (حجم الصورة يساوي 2048x1536 بكسل) وهي مزودة ببصريات مصنعة من قبل Carl Zeiss مع إمكانية التركيز الآلي. تم أولاً استخدام آلة التصوير دون معايرة للحصول على النموذج ثلاثي الأبعاد ومن ثم معايرة هذه الآلة باستخدام شبكة معايرة خاصة وإعادة حساب النموذج ثلاثي الأبعاد. بعد ذلك تمت مقارنة النموذج غير المعاير مع النموذج المعاير من خلال قياسات منقذة على العنصر. في النهاية قمنا بمناقشة حدود استخدام مثل هذا النوع من آلات التصوير في تطبيقات التصوير قريب المدى.

الكلمات المفتاحية: هاتف نقال، فوتوغراممري قريبة، نمذجة ثلاثية الأبعاد، معايرة.

* مدرس - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Verification of The Use of Mobile Phone Built-in Cameras in Modeling

Dr. Omar Al Khalil*

(Received 28 / 2 / 2011. Accepted 4 / 5 / 2011)

□ ABSTRACT □

The majority of nowadays mobile phones have built-in high resolution digital cameras. This encourages us to use them in close range photogrammetry applications, after a pre-calibration procedure to define the parameters of their interior orientation. In this paper, the limits of the use of these cameras in 3D photos-based modeling are discussed. The photos are taken by the camera assigned with the mobile phone Nokia 6500, and they are used to calculate the 3D model of a small object. This camera is a 3.2 Mega Pixel (2048x1536 pixels) digital camera with Carl Zeiss optics and autofocus capability. At first, the uncalibrated camera is used to achieve the 3D model, then the camera is calibrated using a special mire and the 3D model is recalculated. The resultant model is compared with the other through measurements done on the object. At last, the possibilities of using this kind of camera in close range photogrammetry applications are defined.

Key words : Mobile phone, Close range photogrammetry, 3D modeling, Calibration.

* Assistant Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يتيح لنا الأسلوب متعدد الصور Multi-images للمساحة التصويرية القريبة المدى Close range photogrammetry ، الحصول على النموذج الصوري ثلاثي الأبعاد 3D Photomodel للعناصر المصورة. وللحصول على المعطيات ثلاثية الأبعاد، فإننا نحتاج إلى التقاط داخل الفراغ بين شعاعين على الأقل أو للتقاطع بين شعاع و سطح حاو على النقطة. وفي حال توافر أكثر من شعاعين (هذا يعني أنه يمكن رؤية العناصر على ثلاث صور على الأقل) فإن حلاً باستخدام تعديل الحزم Bundle Adjustment هو حل ممكن. ويستند هذا التعديل إلى كل القياسات الموجودة (تلك التي تم إجراؤها على الصور أو حتى قياسات أخرى). تقود هذه الإمكانيات إلى أساليب متعددة لإسقاط عنصر ما (الخليل و غروسنمير، 2003).

كان الحصول على الصور اللازمة لحساب النموذج الصوري يتم باستخدام آلات تصوير خاصة و هي ما يعرف باسم آلات التصوير المترية Metric cameras. هذه الآلات غالية الثمن و يتطلب استخدامها خبرة و معرفة. لكن مع دخول العصر الرقمي، تم تطوير آلات التصوير الرقمية Digital cameras و تم استخدامها لاحقاً في تطبيقات المساحة التصويرية القريبة على نطاق واسع.

من المسلم به، أننا نشهد الآن ثورةً تقنيةً على صعيد الاتصالات و التي يعتبر الهاتف النقال Mobile phone من أهم مظاهرها. وتملك الأجيال الحديثة من هذه الهواتف آلات تصوير رقمية داخلية ذات دقة تمييز Resolution تزداد يوماً بعد يوم مما يدفعنا للتفكير في استخدامها في مجال المساحة التصويرية القريبة الرقمية. و لكن هذه الآلات ذات هندسية داخلية مجهولة أي عناصر التوجيه الداخلي (إحداثيات النقطة الرئيسية للصورة، البعد المحرقي لآلة التصوير ومعاملات التزيغات نصف القطرية والمماسية للعدسة) الخاصة بها غير معروفة مما يوجب القيام بعملية معايرة مخبرية Calibration لها للحصول على هذه العناصر و ذلك قبل استخدام صورها في النمذجة. تعتبر هذه العملية معقدة وتتطلب مخابر وتجهيزات خاصة (Devrim A, Armin G. 2009). من جهة أخرى، وفي حال توافر العدد الكافي من الصور والقياسات، يمكن القيام بعملية معايرة ذاتية Self-calibration بتطبيق التعديل بطريقة الحزم Bundle adjustment حيث يتم حساب كل عناصر التوجيهات (داخلي و خارجي) دفعةً واحدة (KRAUS et al, 1997). هذه الإمكانية متوافرة في عدد كبير من برامج المساحة التصويرية القريبة وهي تعطي نتائج عالية الدقة.

تم في هذا البحث استخدام الصور الملتقطة بوساطة آلة التصوير الرقمية الداخلية للهاتف النقال Nokia 6500 وذلك من أجل حساب النموذج ثلاثي الأبعاد لعنصر صغير الأبعاد. دقة تمييز هذه الآلة تبلغ 3.2 MP وهي مزودة ببصريات مصنعة من قبل Carl Zeiss كما أنها تتمتع بإمكانية التركيز الآلي Auto-focus. أما فيما يخص عملية النمذجة، فقد تمت بطريقتين: في الطريقة الأولى تم استخدام آلة التصوير السابقة دون إجراء معايرة لها ومن ثم تم القيام بقياسات على النموذج الناتج لاستخدامها لاحقاً في عملية مقارنة. في الطريقة الثانية تم تطبيق نمذجة ثنائية تستخدم آلة التصوير بعد معايرتها باستخدام أحد البرامج التجارية. و من ثم، تمت المقارنة بين النموذجين باستخدام قياسات حقيقية نفذت على العنصر المنمذج. الهدف هنا هو الدلالة على أهمية المعايرة في رفع دقة النموذج الناتج وكذلك تبين حدود استخدام هذا النوع من النماذج.

أهمية البحث وأهدافه:

تتركز أهمية هذا البحث في أنه يقترح نظاماً للمساحة التصويرية القريبة الرقمية رخيص التكاليف بحيث يمكن لعدد كبير من المختصين و غير المختصين الاستفادة منه في دراساتهم و أبحاثهم في مجالات مختلفة. يهدف البحث بشكل أساسي إلى تقييم كفاءة آلات التصوير الرقمية و خاصةً تلك المرفقة مع الهواتف النقالة في الحصول على نماذج صورية ثلاثية الأبعاد للعناصر المصورة (سنستخدم آلة التصوير الداخلية للهاتف Nokia 6500 كنموذج). كما يهدف إلى توضيح حدود و مجالات استخدام هذا النوع من النماذج في تطبيقات المساحة التصويرية قريبة المدى. من جهة أخرى فإن البحث يهدف إلى توضيح أهمية المعايرة لآلة التصوير من أجل الحصول على نماذج صورية دقيقة. هذه النماذج يمكن استخدامها لأغراض القياسات التي لا تتطلب دقة عالية و لأغراض الإظهار في العمارة و الآثار و الفن.

طرائق البحث ومواده:

1- آلة تصوير الهاتف النقال Nokia 6500

تم استخدام آلة التصوير الرقمية المرفقة مع الهاتف النقال Nokia 6500 في التقاط الصور (الشكل (1)). وهي آلة تصوير رقمية تتمتع بدقة تمييز هندسية (تصل حتى 3.2 ميغابكسل) وصورية جيدة مع إمكانيات الفلاش والتركيز الآلي و التكبير حتى 8 مرات. هذه الآلة مزودة ببصريات مصنعة من قبل Carl Zeiss مع تزيغات أو تشوهات Distortions مقبولة نسبياً كما بينت عملية المعايرة.



الشكل (1). الهاتف النقال Nokia 6500 مع آلة التصوير 3.2 ميغابكسل

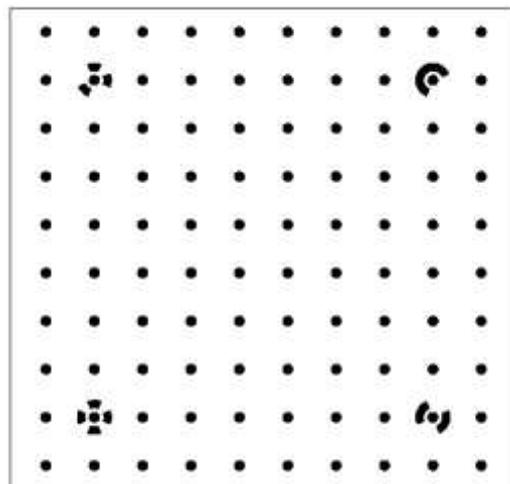
بشكل عام، يعتمد اختيار آلة التصوير على المنتج الذي نسعى للحصول عليه و على الدقة المطلوبة. و عند اختيارنا لآلة تصوير ما، يجب أخذ مجموعة من المعايير بالحسبان، لعل أهمها هي دقة التمييز الهندسية (أو أبعاد البكسل) و أبعاد المستشعر CCD. يملك الهاتف Nokia 6500 مستشعراً CCD ذا أبعاد (6.00 mm, 4.50 mm) مع حجم يصل إلى 3.2 MegaPixel. وهو يولد صوراً عالية الجودة بمقاس أعظمي 2048*1536 pixel مع مجالات لدقة التمييز مبينة في الجدول رقم (1).

الجدول (1). دقة التمييز الهندسية لآلة التصوير في الهاتف النقال Nokia 6500

الحجم بالبكسل	مجال دقة التمييز
3.2 = 2048*1536 pixel ميغابكسل	دقة تمييز عالية
1.9 = 1600*1200 pixel ميغابكسل	دقة تمييز متوسطة
1.2 = 1280*960 pixel ميغابكسل 0.31 = 640*480 pixel ميغابكسل 0.077 = 320*240 pixel ميغابكسل	دقة تمييز منخفضة

2- شبكة و برنامج المعايرة

إن معايرة آلة التصوير ضرورية من أجل الحصول على قياسات دقيقة من الصور. والهدف الأساسي من المعايرة هو تحديد القيمة الحقيقية للبعد المحرقى focal length، إحداثيات النقطة الرئيسية للصورة و التزيغات البصرية للعدسة lens distortion في آلة التصوير المستخدمة. وأهم هذه التزيغات هي التزيغات نصف القطرية Radial distortions لأنها تؤثر في موقع النقطة في الصورة فتؤثر من ثم على الإحداثيات الأرضية المحسوبة انطلاقاً من القياس على الصورة. الطرق المباشرة لمعايرة آلة التصوير تقوم بتصوير عنصر ذي هندسية معروفة (شبكة معايرة) حاو على مجموعة من نقاط الضبط Control Points معلومة الإحداثيات (الشكل 2). ثم يتم تطبيق طريقة التعديل بالحزم من أجل الحصول على معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير و ذلك بعد قياس هذه النقاط على عدة صور ملتقطة لهذه الشبكة. تتميز هذه الطريقة بسهولة تنفيذها و بسرعتها و كذلك بفعاليتها من أجل العناصر الصغيرة و الأبعاد المحرقية الكبيرة. بالنسبة لآلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقال Nokia 6500، فقد تمت معايرتها بهذه الطريقة و باستخدام البرنامج PhotoModeler.



الشكل (2). شبكة المعايرة مع نقاط الضبط.

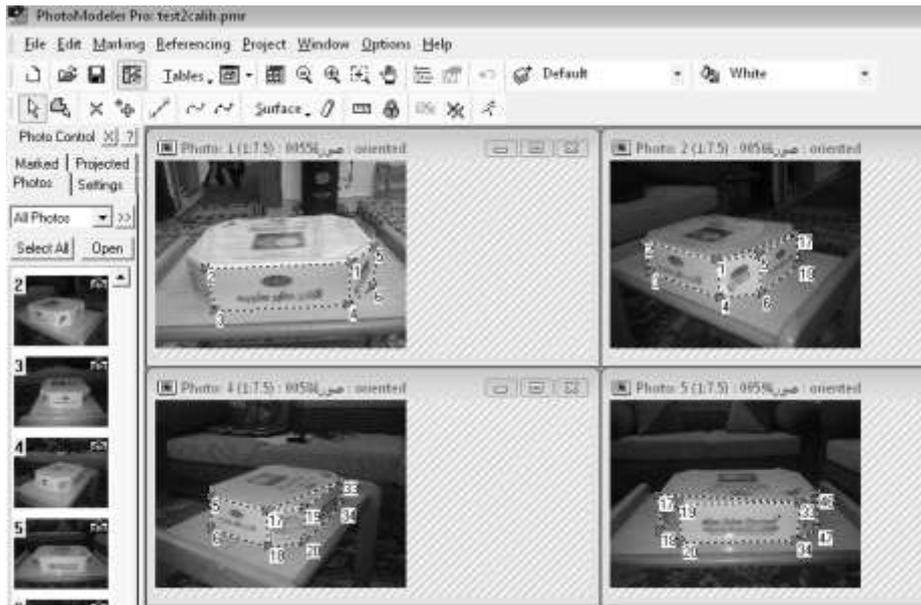
3- الصور اللازمة للنمذجة

تم تطبيق أسلوب الصور المتعددة Multi-images Approach في التقاط الصور اللازمة لنمذجة العنصر المدروس. إن استراتيجية التقاط الصور هنا هي أن كل نقطة مطلوب تحديدها، يجب أن تكون واقعة على تقاطع شعاعين على الأقل بزواوية مقبولة. وتعتمد هذه الزاوية على متطلبات الدقة فقط. إن معرفتنا بتوازي خطوط العنصر المصور وبالوقوع في نفس المستوي لبعض السطوح ويتعامد بعض التفاصيل في فراغ العنصر، يمكن لها أن تدخل في الحسابات وتسمح هذه الحالة بالحصول على حل قوي ومتجانس لهندسية العنصر (COOPER and ROBSON S, 1996).

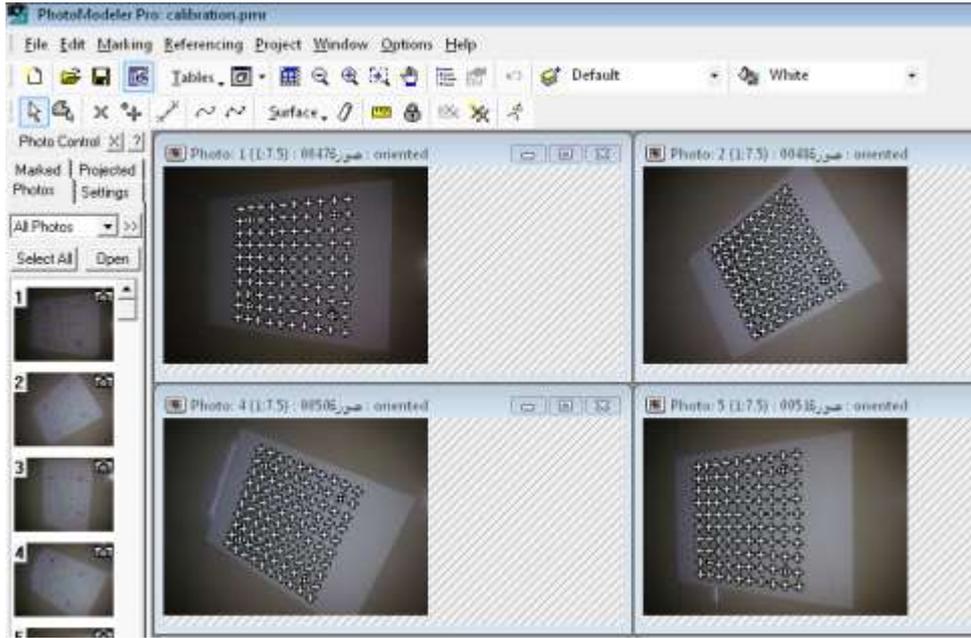
4- برنامج النمذجة

فيما يخص معايرة آلة التصوير، حساب توجيهات الصور وحساب النموذج ثلاثي الأبعاد فقد تم باستخدام البرنامج PhotoModeler Pro.5.1. هذا البرنامج مطور من قبل الشركة الكندية EosSystems يعمل بنظام Windows. يستخدم هذا البرنامج مفهوم المشروع والذي يقوم على المعطيات التالية: الصور، جهاز التصوير المستخدم في الحصول على الصور والقياسات على الصور. يمكن هذا البرنامج من الحصول على معطيات ثلاثية الأبعاد انطلاقاً من صورة واحدة أو من عدة صور. كما يمكن من معايرة جهاز التصوير المستخدم للحصول على مواصفاته الهندسية الداخلية الدقيقة (Eos Systems. 2002). حيث يمكن، في هذه الحالة، حساب البعد المحرفي للجهاز المستخدم والنقطة الرئيسية للصورة وتشوهات المصفوفة CCD وتزيغات العدسة. الشكلان (3) و (4) يبينان واجهة البرنامج الرئيسية مع القياسات على الصور و كذلك واجهة المعايرة.

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



الشكل (3). الواجهة الرئيسية للبرنامج مع القياسات على الصور.



الشكل (4). الواجهة الرئيسية للبرنامج مع صور لشبكة المعايرة.

النتائج والمناقشة:

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

1. النقاط الصور للعنصر المدروس باستخدام آلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقال Nokia 6500.
2. إنجاز عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد للعنصر بآلة التصوير غير المعايرة.
3. معايرة آلة التصوير والحصول على معاملات التوجيه الداخلي.
4. إعادة حساب النموذج مع أخذ نتائج المعايرة بالحسبان.
5. تنفيذ قياسات على كلا النموذجين السابقين و مقارنتها مع بعضها بعضاً عن طريق قياسات حقيقية منفذة على العنصر نفسه.

الصور اللازمة للنمذجة

فيما يخص العنصر المدروس، فقد تم اختيار عنصر صغير الأبعاد كأنموذج للدراسة. ولكن من الممكن تعميم طريقة العمل والنتائج على عناصر أكبر. عند النقاط الصور لهذا العنصر حرصنا على تجانس ظروف أخذ الصور وعلى أن تكون المسافة بين العنصر وآلة التصوير ثابتة تقريباً في كل اللقطات وأن لا نستخدم إمكانيات التكبير Zoom in والتصغير Zoom out وذلك لضمان عدم تغير معاملات التوجيه الداخلي من صورة إلى أخرى (WALDHÄUSL, P. 1994). بلغ عدد الصور الملتقطة باستخدام آلة تصوير الهاتف النقال Nokia 6500، ثمانية صور مع دقة تمييز أعظمية و حجم صورة مساو لـ 3.2 MP. يبين الشكل (5) التالي العنصر المدروس مع مواقع النقاط الصور.

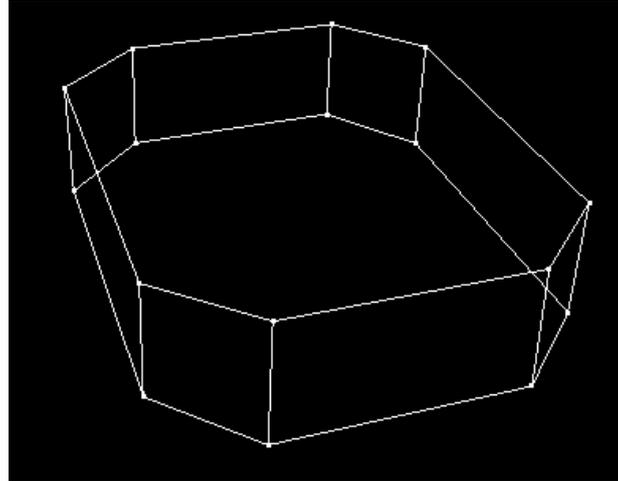


الشكل (5). العنصر المدروس ومحطات التقاط الصور.

حساب الأنموذج ثلاثي الأبعاد غير المعايير

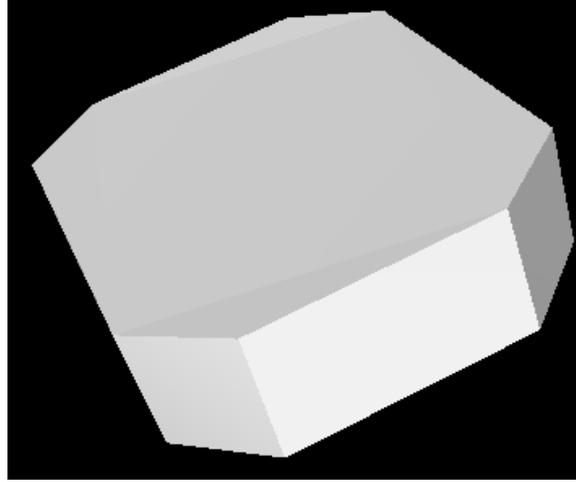
تم العمل على الصور الناتجة لحساب الأنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد للعنصر و ذلك باعتبار أن آلة التصوير غير معايرة. تمت النمذجة باستخدام البرنامج PhotoModeler. يمكن، بشكل عام، أن نوجز الخطوات اللازمة لتوليد الأنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد للعنصر المصور باستخدام برامج النمذجة بما يلي (GRUSSENMEYER, P.et al, 2001):

- يتم أولاً حساب التوجيهات الداخلية و الخارجية لمختلف الصور و من ثم تعريف الأنموذج الخيطي wire frame model ثلاثي الأبعاد (نقاط و خطوط) للعنصر كما في الشكل (6).



الشكل (6). تعريف النموذج الخيطي.

- الخطوة الثانية تتضمن معالجة الأنموذج الخيطي السابق حيث يتم إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام سطوح محسوبة انطلاقاً من الخطوط الموجودة كما في الشكل (7).



الشكل (7). تعريف النموذج السطوح.

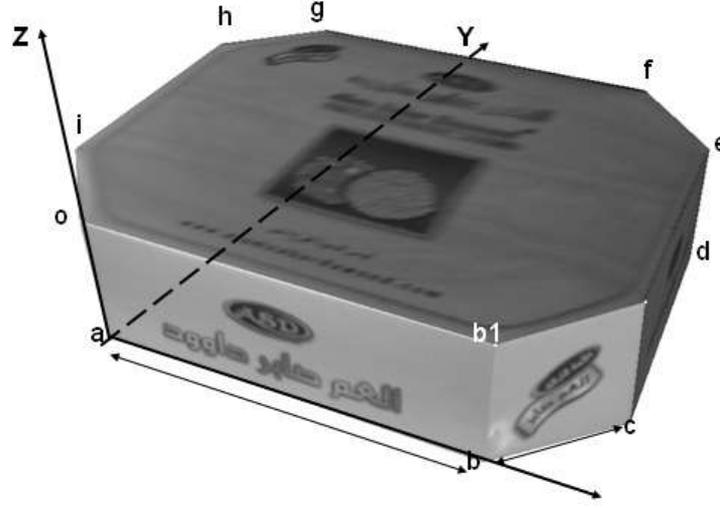
- الخطوة الثالثة تتضمن إعادة إسقاط الصور المختارة على الأنموذج السطحي باستخدام تقنية إطلاق الأشعة و هذا ينتج النموذج الصوري المبين في الشكل (8).



الشكل (8). إنتاج النموذج الصوري.

لتحليل دقة النموذج السابق تم تحديد نقاط على النموذج السابق كما في الشكل (9)، ومن ثم تم قياس إحداثياتها.

قمنا بعد ذلك بقياس إحداثيات نفس النقاط السابقة على العنصر مباشرةً و ذلك بعد نسبه إلى نفس جملة الإحداثيات (القياس تم باستخدام مسطرة أنفار دقيقة تمكننا من تقدير أجزاء المليمتر). الهدف هنا هو مقارنة هذه الإحداثيات مع تلك المقاسة على الأنموذج السابق. يبين الجدول رقم (2) الإحداثيات المقاسة والحقيقية مع الفروق بينها.



الشكل (9). النموذج الناتج مع مجموعة من النقاط التي قيست عليه.

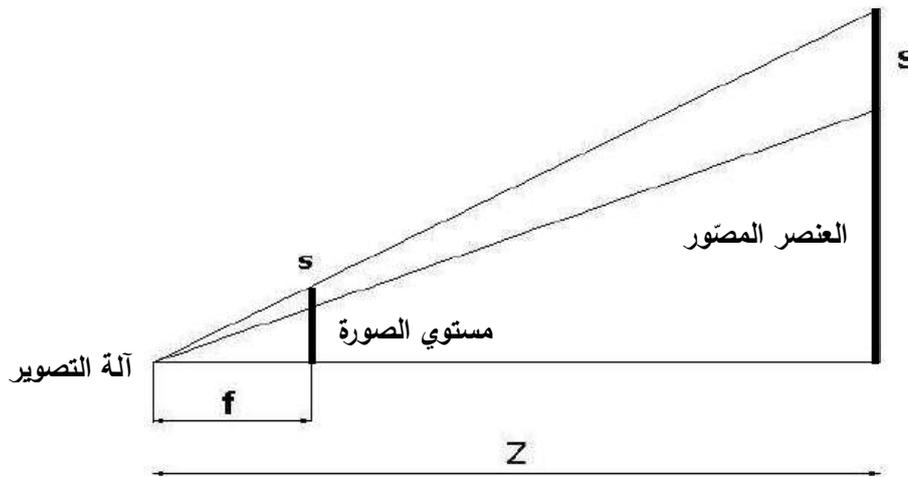
الجدول (2). مقارنة الإحداثيات المقاسة على النموذج غير المعايير مع الإحداثيات الحقيقية.

النقطة	الإحداثيات المقاسة (سم)			الإحداثيات الحقيقية (سم)			الفروق (مم)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ
b1	16.7	0.0545	5.9	16.6	0	6	-1	-0.54	1
C	20.9	4.1	0.0448	20.8	4	0	-1	-1	-0.44
O	-0.2	0	6	0	0	6	2	0	0
e	20.5	16	5.8	20.8	15.8	6	3	-2	2
F	16.7	20.1	5.8	16.6	20	6	-1	-1	2
G	-0.1	19.9	5.7	0	20	6	1	1	3
H	-4	15.8	5.9	-4	15.8	6	0	0	1
I	-3.8	4.3	5.9	-4	4	6	-1	-3	1
D	20.7	15.9	-0.2	20.8	15.8	0	1	-1	2

نلاحظ من الجدول السابق أن بعض الفروقات بين الإحداثيات الحقيقية و الإحداثيات المقاسة كبيرة نسبياً. ويمكن إرجاع هذه الفروق إلى القياس حيث يظهر تأثير حجم بكسل الصورة و إلى مهارة الإنسان في القياس، كما نتجت هذه الفروق عن عدم معايرة آلة التصوير. و لتوضيح ذلك سنناقش تأثير هذه المصادر على دقة قياس النقطة.

أولاً : تأثير حجم البكسل على دقة القياس

في مثالنا، تم التقاط الصور بحجمها الأكبر و هو (2048*1536 pixel) حيث بلغ حجم البكسل ما يقارب 3 ميكرون. و لدراسة تأثير أبعاد البكسل على دقة القياس، سنفرض أن دقة القياس على الصورة هي من درجة البكسل الواحد، ومن ثم لا بد لنا من معيار يحدد دقة القياس بوحدات طولية. أي يجب أن نحدد المساحة التي يغطيها البكسل الواحد من العنصر المصور. و كلما كانت هذه المساحة أقل كلما كانت دقة القياس على الصور أكبر. و هي تتبع بشكل مباشر للمسافة الفاصلة بين العنصر المصور و آلة التصوير كما في الشكل (10)، و يمكن استنتاجها من العلاقة التالية:



الشكل (10). العلاقة بين البكسل على الصورة و البكسل على العنصر.

بتطبيق نظرية تالس نجد :

$$\frac{s}{S} = \frac{f}{Z} \Rightarrow S = \frac{(s \times Z)}{f}$$

حيث:

S - المسافة التي يغطيها البكسل على العنصر،

s - المسافة التي يغطيها البكسل على الصورة،

f - البعد المحرقي لآلة التصوير.

Z - المسافة بين آلة التصوير و العنصر.

آلة التصوير المرفقة مع الهاتف Nokia 6500 ذات بعد محرقي أولي (أي مع إيقاف إمكانات التكبير Zoom In و التصغير Zoom Out) مساو لـ 6.06 mm. سنقوم بتغيير المسافة الفاصلة بين الجسم و آلة التصوير لأخذ فكرة حول الدقة التي يمكن بلوغها عند إجراء قياس ما على الصور. و ذلك باعتبار أن حجم البكسل على الصورة $s = 3 \text{ micron}$.

سنطبق العلاقة السابقة من أجل مسافة بين العنصر و آلة التصوير مساوية لـ 1 متر :

$$S = \frac{(3 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3)}{6.06} = 0.5 \text{ mm}$$

يبين الجدول (3) نتائج تطبيق المعادلة السابقة لحساب المسافة التي يغطيها البكسل الواحد على العنصر كتابع للمسافة بين العنصر و آلة التصوير و يعطي الدقة المتوقعة أيضاً (على اعتبار أن دقة القياس مساوية لبعده البكسل الواحد).

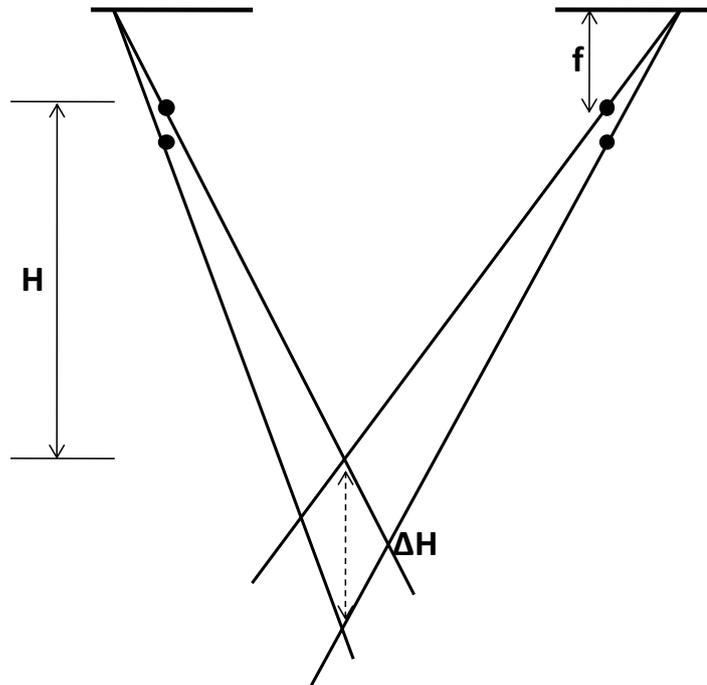
الجدول (3). أبعاد البكسل على العنصر كتابع لبعده آلة التصوير عن العنصر

الدقة الممكن بلوغها	بعد البكسل على العنصر	المسافة بين آلة التصوير و العنصر
0.5 mm	0.5 mm	1 m
2.5 mm	2.5 mm	5 m
5 mm	5 mm	10 m
7.5 mm	7.5 mm	15 m
10 mm	10 mm	20 m

إذا أخذنا بالحسبان أن البعد الذي تم التقاط الصور عنده للجسم الصغير الذي قمنا بنمذجته، يبلغ تقريباً 1 متر، فإننا سنعتبر، عند تحليل النموذج ثلاثي الأبعاد الناتج، أن كل قياس دقته أفضل من 0.5 mm هو قياس مقبول.

ثانياً: تأثير الخطأ في البعد المحرقي على دقة القياس

يبين الشكل التالي تأثير الخطأ في البعد المحرقي على النموذج الناتج :



الشكل (11). تأثير خطأ في البعد المحرقي على النموذج.

بتطبيق نظرية تالس على الشكل السابق نجد :

$$\frac{\Delta f}{\Delta H} = \frac{f}{H} \Rightarrow \Delta H = \frac{H \times \Delta f}{f}$$

حيث :

f - البعد المحرقي.

H - المسافة بين آلة التصوير و العنصر .

Δf - الخطأ في البعد المحرقي.

ΔH - الخطأ في النموذج.

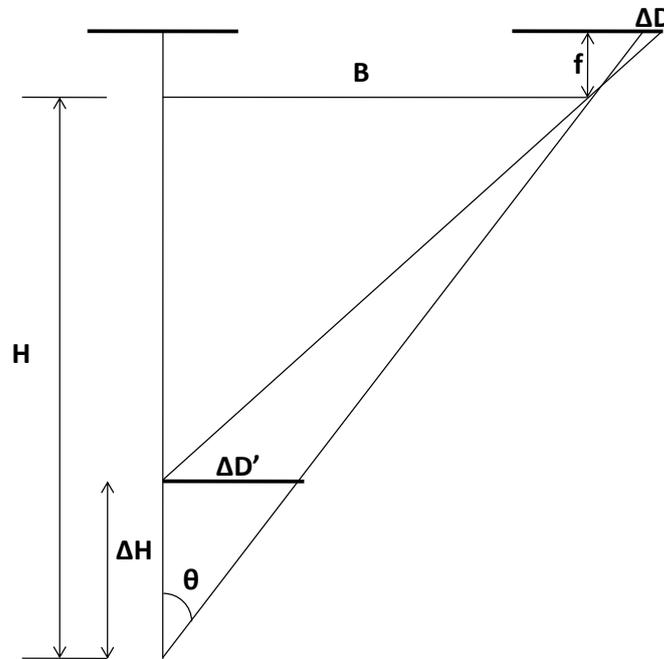
إذا افترضنا أن الخطأ على البعد المحرقي يبلغ 0.01 mm، و لدينا المسافة بين العنصر المصور و آلة التصوير و البالغة 1 m فإن الخطأ الناتج على النموذج هو:

$$\Delta H = \frac{1 \times 10^3 \times 0.01}{6.06} = 1.6 \text{ mm}$$

إذاً من أجل خطأ مساو لـ 0.01 mm سيظهر خطأ مساو لـ 1.6 mm على النموذج و هذا يفسر أهمية البعد المحرقي في تحديد دقة النموذج الناتج.

ثالثاً : تأثير التزيغات على دقة القياس

سنهتم هنا بتحديد تأثير التزيغات نصف القطرية فقط لأنها تسبب خطأً على موقع نقاط العنصر في الصورة كما يوضح الشكل التالي:



الشكل (12). تأثير التزيغات على النموذج.

$$\frac{\Delta D}{f} = \frac{\Delta D'}{H - \Delta H} \quad \text{حسب نظرية تالس لدينا :}$$

حيث ΔD هو الانتقال الناتج عن التزيغات نصف القطرية و الذي يقابله الانتقال $\Delta D'$ في العنصر. أما المقدار ΔH فهو يمثل الخطأ في النموذج و يعتبر مهماً بالنسبة للبعد بين آلة التصوير و العنصر H . إذا استخدمنا المثلثات نجد :

$$\tan \theta = \frac{B}{H} = \frac{\Delta D'}{\Delta H}$$

ومنه نجد:

$$\Delta H = \frac{\Delta D' H}{B}$$

وهي العلاقة التي تربط الانتقالات بالتزيغات. حيث B هي المسافة الفاصلة بين اللقطتين و θ هي الزاوية التي تشكلها الحزم المختلفة التي ترصد النقطة. و لكي نكون فكرة حول أهمية هذا التأثير سنفرض أن المسافة الفاصلة بين صورتين في مثالنا كانت 50 سم و أن الانتقال الناتج عن التزيغات نصف القطرية كان مساوياً لبكسل واحد (يساوي 3 ميكرون في حالتنا) و لدينا البعد المحرقي مساوياً لـ 6.06 mm والمسافة H تساوي متراً واحداً. ومنه سنجد :

$$\Delta D' = \frac{H \times \Delta D}{f} = \frac{1 \times 3 \times 10^{-6}}{6.06 \times 10^{-3}} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\Delta H = \frac{0.5 \times 1 \times 10^3}{50 \times 10^2} = 0.1 \text{ mm}$$

إذاً لدراسة الدقة المتوقعة للقياس لابد من أخذ مصادر الأخطاء السابقة كلها بالحسبان والحكم من ثم على دقة الأنموذج السابق. إذا أخذنا كل مصادر الأخطاء السابقة بالحسبان وهي:

1. تأثير حجم البكسل و الذي سنسميه e_1
 2. تأثير البعد المحرقي و الذي سنسميه e_2
 3. تأثير التزيغات و الذي سنسميه e_3
- فإن الخطأ الكلي سيكون :

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}$$

و بالتعويض بالقيم التي افترضناها سابقاً نجد أن الخطأ الكلي المقبول على قياس النقطة في الصورة هو:

$$e = \sqrt{(0.5)^2 + (1.6)^2 + (0.1)^2} = \pm 1.679 \text{ mm}$$

استناداً إلى هذه القيمة نجد أن معظم الفروق بين الإحداثيات المقاسة على الأنموذج غير المعايير والإحداثيات الحقيقية صارت مبررة. أما الفروقات غير المبررة فنرجعها إلى صعوبة قياس النقطة على الأنموذج وهنا تدخل مهارة القائس البشري وهذا مصدر لم تتم دراسة تأثيره لأنه نسبي. و للتقليل من تأثير الخطأين الثاني والثالث، لابد من معايرة آلة التصوير والحصول على معاملات الداخلية الدقيقة.

معايرة آلة التصوير وحساب الأنموذج المعايير

للحصول على الأنموذج ثلاثي الإبعاد المعايير كان لابد أولاً من معايرة آلة تصوير الهاتف النقال. تتطلب معايرة آلة التصوير المرور بعدة خطوات. أول هذه الخطوات هي التقاط صور لشبكة المعايرة Calibration grid

المرفقة مع البرنامج PhotoModeler. يمكن طباعة هذه الشبكة افتراضياً بحجم ورق الرسالة (حجم هذا النوع من الورق هو 27.94×21.59) cm و لكن من الممكن وضعها على مقياس آخر أكبر أو أصغر. و في حال أردنا الحصول على دقة أعلى فإننا نطبع الشبكة بمقياس قريب من مقياس الجسم الذي نود نمذجته. في بحثنا قمنا بطباعة الشبكة على حجم ورقة A4. قمنا بتثبيت هذه الشبكة على الأرض و قمنا بالنقاط 8 صور للشبكة من مجموعة مواقع. قمنا بعد ذلك بإجراء المعايرة باستخدام البرنامج و حصلنا على النتائج المبينة في الجدول (4).

حيث إن k_1, k_2, k_3 هي ثوابت التزيغات نصف القطرية Radial distortions المتناظرة للعدسة و p_1, p_2 هي ثوابت التزيغات المماسية Tangential للعدسة. نلاحظ أن قيم الانحرافات المعيارية الخاصة بالمعاملات المقدرة، مرتفعة نسبياً و هذا راجع على الأغلب إلى النوعية السيئة للعدسات المرفقة مع آلة التصوير الخاصة بالهاتف النقال. تم بعد ذلك إعادة حساب الأنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد مع أخذ نتائج المعايرة السابقة بالحسبان. ثم قمنا بقياس إحداثيات نفس النقاط المبينة في الشكل (9) على هذا الأنموذج. نبين في الجدول (5) الإحداثيات المقاسة والحقيقية مع الفروق بينها.

الجدول (4). معاملات التوجيه الداخلي (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال.

المعامل	المقدار	الانحراف المعياري
البعد المحرقي	6.042602mm	± 0.025 mm
Xp	3.186518mm	± 0.023 mm
Yp	2.285287mm	± 0.002 mm
K1	2.288-e-003	$\pm 8.3e-005$
K2	2.089e-004	1.5e-005
K3 (لم يتم إدخاله في التعديل)	0	0
P1	4.094-e-005	1.1e-004
P2	5.096e-005	3.0e-005

الجدول (5). مقارنة الإحداثيات المقاسة على النموذج المعيار مع الإحداثيات الحقيقية.

النقطة	الإحداثيات المقاسة (سم)			الإحداثيات الحقيقية (سم)			الفروق (مم)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ
b1	16.7	0.007	5.9	16.6	0	6	-1	0.07	1
C	20.8	4	0.008	20.8	4	0	0	0	-

									0.08
O	-0.1	0	6	0	0	6	1	0	0
e	20.4	15.8	5.9	20.8	15.8	6	4	0	1
F	16.5	19.9	5.9	16.6	20	6	1	1	1
G	-0.1	19.6	5.8	0	20	6	1	4	2
H	-4	15.5	6	-4	15.8	6	0	3	0
I	-3.8	4.2	6	-4	4	6	-2	-2	0
D	20.6	15.8	-0.1	20.8	15.8	0	2	0	1

نلاحظ من خلال مقارنة النتائج تحسن الدقة في حال معايرة آلة التصوير. و هذا بسبب تصحيح موقع النقاط المقاسة على الصور من الإزاحات الناتجة عن تزيغات العدسة بأنواعها. و لكن الدقة عموماً ليست عالية فالانتقالات كبيرة و ذلك نسبة لأبعاد العنصر المنمذج الصغيرة.

الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد إلى الدراسة النظرية المقدمة حول النمذجة ثلاثية الأبعاد باستخدام الصور الملتقطة باستخدام آلة التصوير المرفقة مع الهاتف النقّال ذات دقة التمييز 3.2 MP والتطبيق العملي للدراسة، نستنتج أنه من الممكن تنفيذ نمذجة كاملة هندسياً و صورياً باستخدام برامج تعمل على حواسيب شخصية وأجهزة التصوير الرقمية المتواضعة المرفقة مع الهواتف النقّالة وذلك بفضل التطور الكبير في أجهزة التصوير، أساليب النقاط الصور وبرمجيات المعالجة. ولكن بالمقابل وجدنا أنه من غير الممكن استخدام هذا النوع من النماذج في الحصول على قياسات عالية الدقة ولكن من الممكن استخدامه لأغراض العرض والحركية Animation للعناصر. في هذه الحالة يمكن القيام بتطبيقات لحظية وثلاثية الأبعاد كالحركية والتحليق فوق الأنموذج ثلاثي الأبعاد و أيضاً الزيارة التفاعلية Interactive visit لهذا النموذج .

لا بد لنا من الإشارة إلى أن كفاءة آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقّالة تزداد يوماً بعد يوم فبعض هذه الهواتف يملك الآن آلات تصوير تصل دقتها إلى 8 MP مما يجعلها أداة واعدة جداً في مجال النمذجة ثلاثية الأبعاد الدقيقة. يمكن إذاً لهذا النوع من الآت أن يشكل مع برامج تجارية رخيصة التكاليف نظاماً متكافئاً للنمذجة ثلاثية الأبعاد متعددة الأغراض. فقد وجدنا مثلاً أن البرنامج PhotoModeler يتميز بالكفاءة في الحصول على النموذج الصوري للعناصر المصورة من خلال إمكانياته الذاتية في النمذجة و قدرته على التخاطب مع برامج أخرى على رأسها برامج التصميم بمعونة الحاسب CAD. و هو يمكننا أيضاً من القيام بمعايرة آلية كاملة لآلة التصوير .

نوصي باستخدام هذا النوع من النظم قليلة التكاليف في النمذجة ثلاثية الأبعاد للعناصر صغيرة الأبعاد كاللقى الأثرية من تماثيل أو غيرها.

المراجع:

1. الخليل، عمر .، غروسنمير، بيير..، المساحة التصويرية المعمارية. نشرت مع الأوراق العلمية الخاصة بالدورة التدريبية التخصصية حول الترميم و الحفاظ على التراث العمراني التي أقامها فرع نقابة المهندسين بحلب- لجنة التراث، 2003، 15.
2. COOPER, M.A.R.; ROBSON, S.; *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.
3. DEVRIM, A.; ARMIN, G. *COMPARATIVE GEOMETRIC AND RADIOMETRIC EVALUATION OF MOBILE PHONE AND STILL VIDEO CAMERAS.* The Photogrammetric Record 24(127), September 2009, 217–245.
4. EOS SYSTEMS.. *User Manuel of PhotoModeler Pro5.1.* Canada, 2002.
5. GRUSSENMEYER, P.; HANKE, K.; STREILEIN, A. *Applications métrologiques de la photogrammétrie numérique.* In *Photogrammétrie numérique*, Paris : LAVOISIER, 2001, 317-361.
6. KRAUS, K.; JANSKA, J.; KAGER, H. *Photogrammetry Advanced Methods and Applications.* Volume 2, 4th edition, Dümmler, Bonn, 1997.
7. WALDHÄUSL, P. *3x3 Rules for simple Photogrammetric documentation of architecture.* 1994.
<http://www.univie.ac.at/Luftbildarchiv/wgv/3x3.htm>.

