

## مقارنة طرائق معايرة آلات التصوير الرقمية في المساحة التصويرية و الرؤية بمعونة الحاسب

الدكتور عمر محمد الخليل\*

الدكتور إياد إسماعيل فحصة\*\*

(تاريخ الإيداع 23 / 9 / 2015. قُبل للنشر في 25 / 10 / 2015)

### □ ملخص □

لقد كانت مسألة معايرة آلة التصوير Camera calibration ومازالت مكوناً أساسياً في قياسات المسح التصويري وخاصةً في تطبيقات المساحة التصويرية القريبة عالية الدقة. فبالرغم من النمو السريع لاستعمال آلات التصوير الرقمية في تطبيقات القياسات ثلاثية الأبعاد، إلا أنه توجد الكثير من الحالات التي لا يمكن فيها استخدام هندسية شبكة الصور للحصول على معاملات آلة التصوير في موقع العمل. من أجل هذا السبب، ظهرت الحاجة من جديد إلى تطوير أسس للمعايرة المستقلة لآلة التصوير في أبحاث المساحة التصويرية والرؤية بمعونة الحاسب. في هذا البحث، سنعرض مراجعة سريعة لأهم طرائق المعايرة في المساحة التصويرية والرؤية بمعونة الحاسب كما سنقوم بمقارنة طريقة المعايرة الذاتية Self-calibration المستخدمة بشكل واسع في مجال المسح التصويري مع طريقة الخطوتين والتي تعتبر أحدث ما توصلت إليها الأبحاث في مجال الرؤية بمعونة الحاسب في مجال معايرة آلات التصوير الرقمية.

**الكلمات المفتاحية:** معايرة آلة التصوير ، رؤية بمعونة الحاسب، التعديل بطريقة الحزم، معاملات داخلية، معاملات خارجية.

\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.  
\*\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

## Comparison of digital cameras calibration methods in photogrammetry and computer vision

Dr. Omar AL Khalil\*  
Dr. Iyad Fahsa\*\*

(Received 23 / 9 / 2015. Accepted 25 / 10 / 2015)

### □ ABSTRACT □

Camera calibration has always been an essential component of photogrammetric measurement, especially in high-accuracy close-range applications. Although the rapid growth in adoption of digital cameras in 3D measurement applications, there are many situations where the geometry of the image network will not support robust recovery of camera parameters via on-the-job calibration. For this reason, stand-alone camera calibration has again emerged as an important issue in photogrammetry and computer vision.

In this paper, we give a rapid overview of the approaches adopted for camera calibration in photogrammetry and computer vision. Also, we compare the method of self-calibration, largely used in photogrammetry, with the tow-steps method applied in computer vision for digital camera calibration.

**Key words:** Camera calibration, Computer vision, Bundle adjustment, Intrinsic parameters, Extrinsic parameters.

---

\*Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة

تعتبر معايرة آلة التصوير خطوةً ضرورية للحصول على معلومات مترية من الصور ثنائية البعد. هذا وقد تم القيام بالعديد من الأبحاث في هذا المجال والتي أنجزتها الجهات المختصة بالمساحة التصويرية [2], [1] أولاً ثم أضافت إليها الجهات العاملة في مجال الرؤية بمعونة الحاسب [4], [3]. وبشكل عام، تنقسم عملية المعايرة إلى مرحلتين :

1. نمذجة آلة التصوير : وهي التعبير الرياضي عن السلوك الفيزيائي والبصري لآلة التصوير وذلك باستخدام مجموعة من المعاملات.

2. تحديد قيم هذه المعاملات والتي تنقسم بدورها إلى مجموعتين هما : معاملات داخلية Intrinsic parameters (تقابل معاملات التوجيه الداخلي Interior Orientation) ومعاملات خارجية Extrinsic parameters (تقابل معاملات التوجيه الخارجي Exterior Orientation). فيما يخص المعاملات الخارجية فهي تتمزج الهندسية الداخلية والمواصفات البصرية لآلة التصوير. وبشكل أساسي، تعبر هذه المعاملات عن كيفية إسقاط الضوء عبر العدسة على مستوي الصورة. أما المعاملات الخارجية، فهي تحدد موقع وتوجيه آلة التصوير في نظام إحداثيات العنصر والذي سيتم فيه اقتطاع المعلومات المترية.

يمكن اعتبار أن آلة التصوير معايرة إذا تم تحديد معاملات الداخلية أي البعد المحرق Focal length والمسافة الرئيسية Principal distance ، إحداثيات النقطة الرئيسية Principal point ومعاملات التزيغات نصف القطرية Radial distortions وعدم بالمركز الاشتراك Decentering للعدسة.

لقد تم تطوير العديد من الخوارزميات لمعايرة آلة التصوير في أبحاث المسح التصويري و الرؤية بمعونة الحاسب. وهذه الخوارزميات تستند بشكل رئيسي على النموذج الإسقاطي لآلة التصوير Projective camera. وقد تكون خوارزمية المعايرة الذاتية Self-calibration هي الأولى التي استخدمت في سبعينيات القرن الماضي في مجال المساحة التصويرية القريبة كما شكلت طرائق المعايرة التحليلية محور بحث مهم في هذا المجال لسنوات طويلة. في الواقع، كانت معايرة آلة التصوير قبل ذلك تتم عبر رصد عنصر معايرة ذي هندسية ثلاثية الأبعاد معروفة وبدقة عالية جداً. عنصر المعايرة يتألف عادةً من مستويين أو ثلاثة مستويات متعامدة مع بعضها البعض وهذه الأساليب تتطلب تجهيزات معايرة مكلفة و إعداد متقن [5].

بالنسبة للرؤية بمعونة الحاسب، مازالت مسألة معايرة آلة التصوير تشكل محور اهتمام كبير لدى الباحثين. وقد كانت السمة الغالبة على هذه الأبحاث هي عدم التركيز على الدقة العالية مقابل أننا لسنا بحاجة لمعرفة أي شيء مسبق عن آلة التصوير التي نريد معايرتها كما يمكن لها التعامل مع آلات تصوير ذات قدرات تكبير متغيرة Zoom lenses إضافة إلى إمكانية أتمتة عملية المعايرة بشكل كامل والتعامل مع آلات تصوير ذات معاملات داخلية غير مستقرة وهذا ما لا تستطيع طرائق المعايرة التقليدية (بالرغم من دقتها العالية) المتبعة في المساحة التصويرية إنجازه. يمكننا أن نضيف أن كلفة طرائق الرؤية بمعونة الحاسب (من الناحية الحاسوبية) أقل من تلك المطبقة في مجال المساحة التصويرية. ولكن، قد يكون من المفيد تطبيق طرائق الرؤية بمعونة الحاسب للمعايرة في تطبيقات المساحة التصويرية المترية التي لا تتطلب دقة عالية جداً.

سنقوم في بحثنا هذا بعرض سريع لخوارزميات المعايرة في المساحة التصويرية و الرؤية بمعونة الحاسب و من ثم سنقوم بمقارنة نتائج طريقة المعايرة الذاتية المطبقة في المساحة التصويرية مع طريقة الخطوتين Tow-steps method والتي تعتبر من آخر إنجازات الأبحاث في الرؤية بمعونة الحاسب في مجال معايرة آلة التصوير الرقمية.

## أهمية البحث وأهدافه

تتركز أهمية هذا البحث في إظهار أهمية معايرة آلات التصوير منخفضة التكاليف قبل البدء في اقتطاع معلومات مترية مقبولة الدقة من الصور. كما تتركز أهميته في الإشارة إلى وجود طرائق سهلة وسريعة وقليلة الكلفة في المعايرة تم تطويرها في مجال بحث آخر غير المساحة التصويرية يمكن الاستفادة منها في هذا المجال. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية :

1. يسعى البحث لتقديم مراجعة نقدية لطرائق معايرة آلة التصوير في المساحة التصويرية و الرؤية بمعونة الحاسب.

2. يعرض البحث لطريقة المعايرة الذاتية لآلات التصوير الرقمية والمطبقة بشكل واسع في برامج المسح التصويري وذلك من خلال تنفيذ عملية معايرة لآلة تصوير رقمية باستخدام أحد هذه البرامج (البرنامج PhotoModeler).

3. من ناحية أخرى، البحث يقوم على تنفيذ واحدة من الخوارزميات القائمة على خطوتين المطورة في مجال الرؤية بمعونة الحاسب في حل مسألة من أعقد مسائل المسح التصويري و هي مسألة تحديد معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير وذلك بطريقة سهلة و سريعة.

4. توجيه اهتمام غير المختصين في مجال المساحة التصويرية إلى الاستفادة من الصور الملتقطة بآلات تصوير رقمية (وخاصة تلك المرفقة مع الهواتف النقالة والحاسب المحمولة) و ذلك في اقتطاع معلومات مترية عن المشهد المصورة.

5. الحكم على دقة و موثوقية نتائج المعايرة بطرائق الرؤية بمعونة الحاسب وذلك عبر مقارنتها بنتائج المعايرة التي تمكنا البرامج الاحترافية للمسح التصويري من الحصول عليها.

## طرائق البحث ومواده

### 1- طرائق ونماذج معايرة آلة التصوير

باستخدام مصطلحات المساحة التصويرية، يمكن الانطلاق من معادلات التسامت Collinearity و، هي الأساس في توصيف الإسقاط المنظوري Perspective، لتنفيذ عملية المعايرة. هذا و تتحكم طبيعة التطبيق و الدقة المطلوبة باختيار أحد النموذجين الأساسيين لتوصيف آلة التصوير :

1 - نموذج منظوري مع معاملات داخلية ثابتة. وهو النموذج المعتمد في المساحة التصويرية وهو ينطلق من معادلات التسامت. يحتاج هذا النموذج لتنفيذه إلى خمس نقاط متوافقة ضمن التشكيل متعدد الصور Multi-image. هذا النموذج لاخطي وبالتالي فهو يتطلب معرفة قيم تقريبية لمعاملات المعايرة التي ستحسب بالتريبعات الصغرى.

2 - نموذج إسقاطي Projective وهو النموذج المعتمد في الرؤية بمعونة الحاسب ويستطيع التعامل مع أطوال محرقية متغيرة أو مجهولة ولكنه يحتاج إلى 6 - 8 نقاط متوافقة لإنجاز حل خطي لمسألة المعايرة وهو حل ليس مستقراً دائماً كما أن التعامل مع التزيغات الخاصة بالعدسة ليس سهلاً في هذا النموذج. هنالك معايير أخرى تستخدم لتصنيف طرائق المعايرة وهي :

طرائق المعايرة الخطية Linear مقابل المعايرة اللاخطية Non-linear (وهي التي تأخذ تزيغات العدسة Lens distortions بعين الاعتبار عند نمذجة آلة التصوير) [6] كما يمكن اعتماد معيار نوع المعاملات التي تحسبها طريقة المعايرة (داخلية فقط أو داخلية و خارجية) [7],[8].

طرائق ضمنية implicit أو صريحة Explicit. ففي حالة الطرائق الضمنية لا يمكننا الحصول و بشكل صريح على المعاملات الفيزيائية لآلة التصوير ولذلك فهي غير مفيدة في نمذجة آلة التصوير.

طرائق التقدير اللاخطية Non-linear optimization و طرائق التقدير الخطية Linear optimization لمعاملات نموذج آلة التصوير. في المجموعة الأولى من الطرائق يتم إدخال معاملات تزيغ العدسة إلى النموذج الرياضي لآلة التصوير. وفي هذه الحالة يتم الحصول على معاملات آلة التصوير عبر حل تكراري يقوم على تقنية تصغير تابع محدد. أما المشكلة الأساسية التي تعاني منها هذه الطرائق فهي الحاجة إلى قيم أولية مناسبة للمعاملات المجهولة و ذلك للوصول إلى الحل و هذه المشكلة ليست سهلة الحل في كل الأحوال [9]. أما فيما يخص الطرائق الخطية للمعايرة، فهي تحسب مصفوفة الإسقاط Projection matrix التي تصف إسقاط نقاط العنصر ثلاثي الأبعاد على مستوي الصورة ثنائي البعد [10]. و المشكلة الأساسية لهذه الطرائق هي عدم قدرتها على نمذجة تزيغات العدسة و صعوبة عزل المعاملات الداخلية و الخارجية لآلة التصوير. و لكن هذه الطرائق سهلة و سريعة و لا تحتاج إلى قيم أولية للمعاملات المجهولة.

Tow- طرائق تستفيد من حسنات المجموعتين السابقتين و هي الطرائق المعروفة باسم طرائق الخطوتين steps methods. و هنا يتم القيام بتقدير خطي لحساب بعض المعاملات في الخطوة الأولى. أما في الخطوة الثانية، فيتم حساب ما تبقى من المعاملات تكرارياً [11] [12]. في هذه الطرائق يصبح التقارب نحو الحل مضموناً تقريباً كما أن هذه الطرائق تتميز بالسرعة و الدقة ولذلك فإننا سنستخدمها في بحثنا.

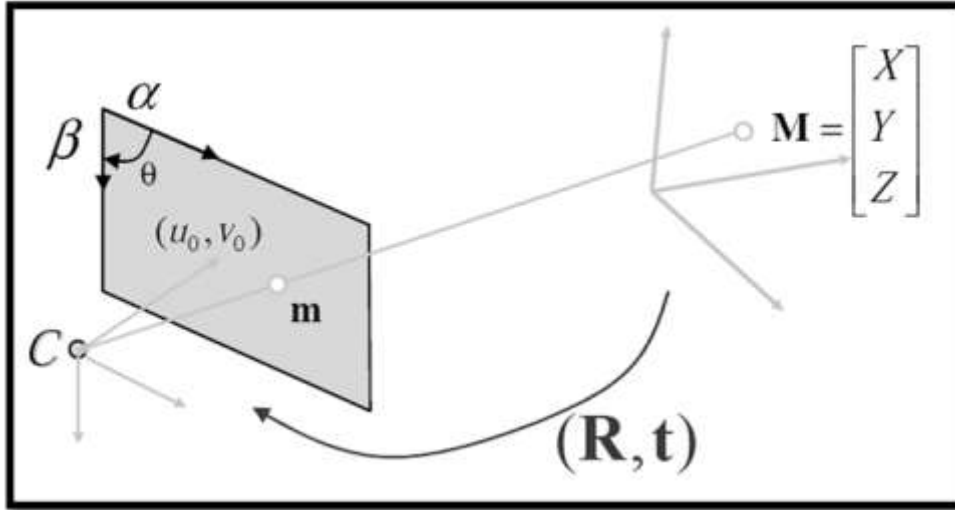
## 2- معايرة آلة التصوير : أسلوب الرؤية بمعونة الحاسب

يتم في هذا الأسلوب استخدام شبكات مرجعية Reference grids وتحدد مصفوفة المعايرة Calibration matrix **A** باستخدام مرتسمات مصفوفة من نقاط العنصر المعروفة. أما الطرائق الأكثر شيوعاً فهي طريقة Tsai [15], Heikkila & Silven [14] و Zhang [13]. وتستند كل هذه الطرائق على النموذج التقبي لآلة التصوير Pinhole camera (الشكل (1)) وتتضمن نمذجة التزيغات نصف القطرية.

في هذا النوع من الأساليب، يتم التعبير عن نقطة ثنائية البعد باستخدام  $m(u, v)$ . أما النقطة ثلاثية الأبعاد فتعطى بالصيغة  $M(X, Y, Z)$ . كما سنستخدم الرمز  $\tilde{x}$  للدلالة على الشعاع المزداد بإضافة 1 كعنصر أخير :

$$\tilde{m} = [u \quad v \quad 1]^T, \quad \tilde{M} = [X \quad Y \quad Z \quad 1]^T$$

Homogenous (نستخدم هنا مفهوم الإحداثيات المتجانسة Homogenous coordinates).



الشكل (1). النموذج التقني لآلة التصوير.

وفي هذا النموذج يتم إسقاط النقطة  $M$  ثلاثية الأبعاد عبر مركز الإسقاط  $C$  في النقطة  $m$ . هذا وتقع النقاط  $M$ ,  $C$ ,  $m$  على استقامة واحدة ويمكن التعبير عن هذا الشرط بالمعادلة التالية :

$$(1) \quad s\tilde{m} = A[R \ T]\tilde{M} = P\tilde{M}$$

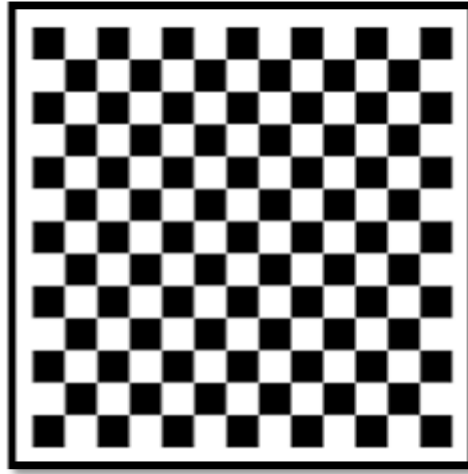
حيث :

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

هي مصفوفة المعاملات الخارجية لآلة التصوير و فيها :  $(u_0, v_0)$  هي إحداثيات النقطة الرئيسية للصورة،  $\alpha, \beta$  هي معاملات المقياس بالاتجاهين  $u$  و  $v$  على الترتيب أما  $\gamma$  فهو معامل انحراف محاور نظام إحداثيات الصورة  $0$  أما  $S$  فهو معامل مقياس. هذا، وتسمى عناصر المصفوفتين  $R$  و  $T$  بالمعاملات الخارجية (دورانات و انتقالات تربط نظام إحداثيات العنصر مع نظام إحداثيات آلة التصوير). وفيما يخص المصفوفة  $P(3 \times 4)$  فهي تسمى مصفوفة إسقاط آلة التصوير Camera projection matrix و هي خليط من المعاملات الداخلية الخارجية. هذا، وتهدف عملية معايرة آلة التصوير إلى تحديد قيم عناصر مصفوفة الإسقاط و التي تصف عملية إسقاط الحيز ثلاثي الأبعاد على مستوي الصورة التي التقطتها آلة التصوير.

تعتبر طريقة Zhang في المعايرة (راجع [13] للاطلاع على تفاصيل هذه الطريقة) هي أفضل وأحدث هذه الطرائق ولذلك فإننا سنستخدمها في بحثنا هذا. في الواقع، يتطلب تطبيق هذه الطريقة شبكة معايرة مستوية (على شكل رقعة شطرنج) يتم تصويرها بشكل جبهوي (أكثر من صورتين) بتوجيهات مختلفة (الشكل (2)). تقوم الخوارزمية المطورة باقتطاع زوايا مربعات الشبكة لحساب تحويل إسقاطي بين هذه النقاط ومرسماتها في  $n$  صورة. يتم لاحقاً حساب المعاملات الخارجية و الداخلية لآلة التصوير مع معاملات التزيغات نصف القطرية للعدسة بتطبيق حل تحليلي قائم على التربيغات الصغرى. يتم أخيراً تطبيق تصغير لاخطي لخطأ إعادة الإسقاط باستخدام طريقة Levenberg-

Marquardt وذلك لتحسين نوعية المعاملات المحسوبة. وعلى خلاف طريقة Tsai و طريقة Heikkila & Silven لا تتطلب هذه الطريقة أي قيم أولية للمعاملات المجهولة.



الشكل (2). شبكة المعايرة.

### 3- معايرة آلة التصوير : أسلوب المساحة التصويرية

لقد تم اعتماد العديد من النماذج لآلة التصوير في المساحة التصويرية القريبة و لكن، يتم عموماً توجيهه و معايرة آلة التصوير باعتماد النموذج الهندسي المنظوري بتطبيق التعديل بالحزم Bundle adjustment [1]. يمكن للقارئ الاطلاع على [16] لمزيد من المراجعات و الطرائق و النماذج المطبقة خلال الخمسين سنة الماضية. النموذج الرياضي الأساسي للمعايرة يستخدم معادلات التسامت اللاخطية المزادة باستخدام معاملات التصحيح الخاصة بمعاملات التوجيه الداخلي كالترزيغات نصف القطرية و عدم الاشتراك في المركز [17]. تزودنا طريقة التعديل بالحزم بكل معاملات النظام مع تقديرات تخص دقة المعاملات كما يمكنها تحديد الروابط بين معاملات التوجيه الداخلي و الخارجي والإحداثيات ثلاثية الأبعاد للنقاط. لمعادلات التسامت الشكل التالي :

$$x_a = u_0 - \frac{f(r_{11}(X_A - X_L) + r_{12}(Y_A - Y_L) + r_{13}(Z_A - Z_L))}{(r_{31}(X_A - X_L) + r_{32}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

$$y_a = v_0 - \frac{f(r_{21}(X_A - X_L) + r_{22}(Y_A - Y_L) + r_{23}(Z_A - Z_L))}{(r_{31}(X_A - X_L) + r_{32}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L))}$$

حيث :  $(u_0, v_0, f)$  هي المعاملات الداخلية للمستشعر ،  $(r_{ij})$  هي عناصر مصفوفة الدوران والتابعة للزوايا Omega, Phi, Kappa حول محاور نظام إحداثيات العنصر ،  $(u_a, v_a)$  هي إحداثيات مسقط نقطة العنصر في نظام إحداثيات المستشعر و  $(X_A, Y_A, Z_A)$  هي إحداثيات نقطة العنصر في نظام إحداثيات العنصر أما  $(X_L, Y_L, Z_L)$  فهي إحداثيات محطة التقاط الصورة. فيما يخص  $\Delta u$  و  $\Delta v$  فهي تتضمن كل التصحيحات على الإحداثيات في الصورة من التزيغات نصف القطرية و عدم الاشتراك بالمركز.

### 4- آلات التصوير المستخدمة في البحث

إن آلات التصوير الرقمية التي ستم معايرتها في هذا البحث هي :آلة التصوير الرقمية المرفقة مع الهاتف النقال Samsung GT-18262 و هي آلة تصوير رقمية تتمتع بدقة تمييز هندسية تصل حتى 5 ميغابكسل، وآلة التصوير الرقمية المرفقة مع الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra و هي آلة تصوير رقمية تتمتع بدقة تمييز

هندسية تصل حتى 13 ميغابكسل (الشكل (3)) تتمتع هذه الهواتف الذكية بمواصفات صورية جيدة مع إمكانيات الفلاش و التركيز الآلي وهي مزودة ببصريات مصنعة من قبل Carl Zeiss (الشكل (3)). إن ما شجعنا على اختيار هذه الآلات هو انتشارها المطرد في تطبيقات المساحة التصويرية القريبة وإمكانياتها الواعدة في هذا المجال.



الهاتف النقال Samsung GT-18262



الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra

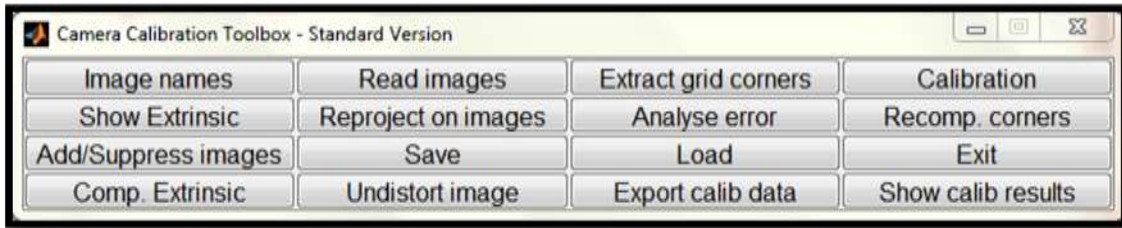
الشكل (3). الهواتف النقالة التي ستمم معايرة آلات تصويرها.

#### 5- البرامج وشبكات المعايرة المستخدمة في البحث

تم استخدام برنامجي معايرة في هذا البحث وهما :

1. البرنامج PhotoModeler Pro.5.1 والذي يستند على أسلوب المساحة التصويرية في المعايرة. 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، وبشكل آلي، من معايرة جهاز التصوير المستخدم للحصول على مواصفاته الهندسية الداخلية الدقيقة [18]. حيث يمكن، في هذه الحالة، حساب البعد المحرقي للجهاز المستخدم والنقطة الرئيسية للصورة وتشوهات المصفوفة CCD وتزيّعات العدسة.

2. صندوق الأدوات Camera Calibration Toolbox (الشكل 4) وهو يستند على أسلوب المعايرة في الرؤية بمعونة الحاسب ويعتبر تنفيذاً لخوارزمية Zhang ويمكن تشغيله باستخدام MATLAB.

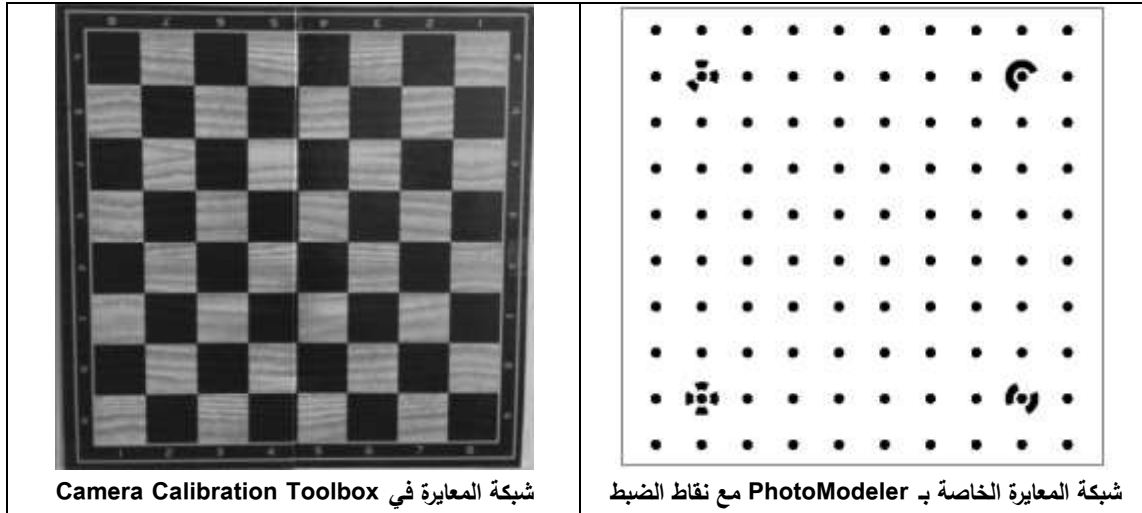


الشكل (4). الواجهة الرئيسية للبرنامج Camera Calibration Toolbox .

أما بالنسبة لشبكة المعايرة الخاصة بالبرنامج PhotoModeler فهي تحوي 100 نقطة إضافة إلى أربع نقاط ضبط متوضعة في أطراف الشبكة (الشكل (5)). وعند استخدام هذه الشبكة يجب تثبيتها على سطح مستو كما يجب أن تظل ثابتة بينما تتحرك آلة التصوير حولها. أما المسافة بين آلة التصوير و شبكة المعايرة فيجب تهيئتها بحيث تظهر كل نقاط شبكة المعايرة ما أمكن في الصورة. ويجب أن تكون ميزات آلة التصوير نفسها لكل اللقطات : دقة



تميز الصورة، التكبير و نوعية الصورة. أما صندوق الأدوات Camera Calibration Toolbox يتيح لنا التحكم بأبعاد شبكة المعايرة الأمر الذي سمح لنا باستخدام رقعة شطرنج عادية مستوية في عملية المعايرة. تحوي هذه الرقعة 8 مربعات في كل اتجاه حيث تبلغ أبعاد المربع الواحد (24x24) mm يجب تثبيت هذه الشبكة على سطح مستوي وتصويرها بشكل جبهوي.



الشكل (5). شبكات المعايرة المستخدمة.

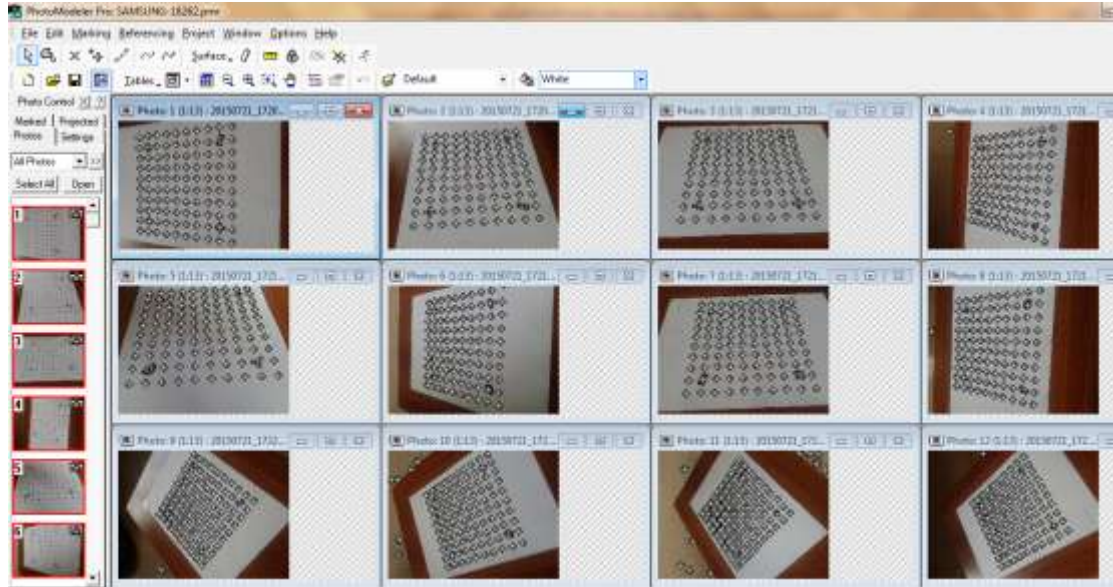
### النتائج والمناقشة

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

1. التقاط الصور لشبكة المعايرة الخاصة بالبرنامج PhotoModeler باستخدام آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة. ومن ثم تنفيذ عملية المعايرة باستخدام PhotoModeler والحصول على المعاملات الداخلية الخاصة بالآلة التصوير. تم التقاط نفس العدد بكل نقال ضمن شروط إضاءة متطابقة.
2. التقاط الصور لشبكة المعايرة الخاصة بالبرنامج Camera Calibration باستخدام آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة. سيتم لاحقاً تنفيذ عملية المعايرة باستخدام Camera Calibration Toolbox والحصول على المعاملات الداخلية الخاصة بالآلة التصوير. تم التقاط نفس العدد بكل نقال وبنفس التوجيهات ضمن شروط إضاءة متطابقة.
3. تحليل النتائج ومقارنتها.

### معايرة آلات تصوير الهواتف النقالة باستخدام PhotoModeler

تم التقاط 12 صورة لشبكة معايرة البرنامج PhotoModeler باستخدام الهاتف النقّال Samsung GT-18262 ومن ثم إنجاز المعايرة بشكل آلي مع البرنامج PhotoModeler (الشكل (6) والجدول (1)).



الشكل (6). معايرة آلة تصوير الهاتف النقال باستخدام PhotoModeler.

الجدول (1). المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Samsung GT-18262.

الهاتف النقال	المعامل	القيمة	الانحراف المعياري
Samsung GT-18262	البعد المحرقى	3.193729 mm	3.8e-004 mm
	Xp	1.683536 mm	3.3e-004 mm
	Yp	1.283445 mm	3.4e-004 mm
	K1	-8.020000E-02	1.200e-004
	K2	-2.3490e-004	9.300e-005
	K3	2.300e-005	2.300e-005
	P1	1.6920e-004	1.400e-005
	P2	-2.7960e-004	1.400e-005

تم تكرار العمل باستخدام الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra فحصلنا على النتائج التالية :

الجدول (2). المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra.

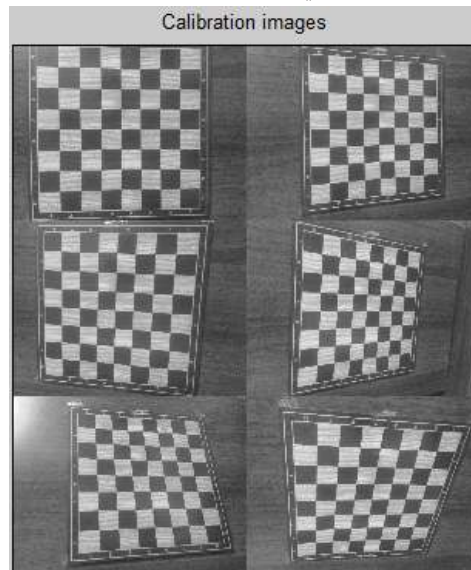
الهاتف النقال	المعامل	القيمة	الانحراف المعياري
Sony Xperia T2 Ultra	البعد المحرقى	4.432500 mm	4.4e-004 mm
	Xp	2.438166 mm	3.8e-004 mm
	Yp	1.864789 mm	3.3e-004 mm

-4.607e-003	-4.607e-003	K1	
1.300e-005	1.313e-004	K2	
1.700e-006	5.229e-005	K3	
8.900e-006	1.114e-004	P1	
7.100e-006	1.864e-004	P2	

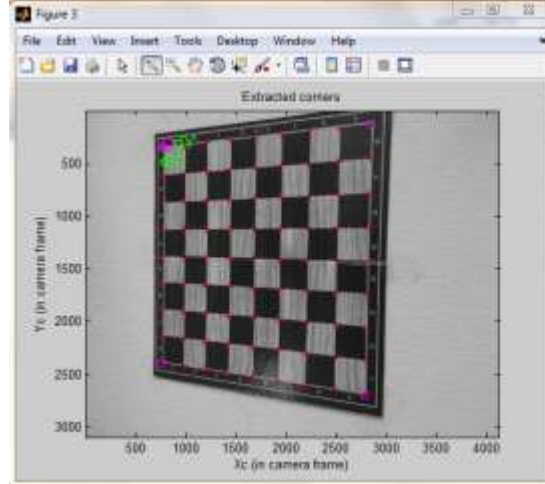
وفق المعايير المعتمدة من قبل البرنامج فإن نتائج المعايرة لآلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة تعتبر جيدة وذلك لان الراسب (الفرق بين النقطة التي قاسها المستخدم و بين النقطة التي يتوقعها البرنامج) الأكبر قيمةً لم يتجاوز 1.5 بكسل في مشروع المعايير.

### معايرة آلات تصوير الهواتف النقالة باستخدام Camera Calibration Toolbox

تم تثبيت شبكة المعايرة على جدار مستو ومن ثم تم التقاط 6 صور لهذه الشبكة بتوجيهات مختلفة باستخدام الهاتف النقال Samsung GT-18262 (الشكل (7)). عملية المعايرة تستند على قياس زوايا الرقعة في كل صورة ومن ثم يقوم البرنامج باستشعار زوايا كل مربع في الرقعة بشكل آلي (الشكل (8)). أما الإحداثيات الأرضية لهذه الزوايا فإن البرنامج يعتمد لحسابها على عدد المربعات في الاتجاهين X و Y وعلى أبعاد المربع الواحد بالمليمتر.



الشكل (7). الصور المستخدمة في المعايرة.



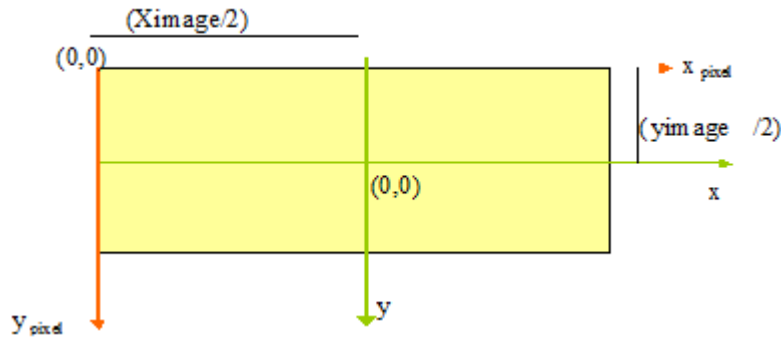
الشكل (8).استشعار زوايا المربعات آلياً.

## ملاحظة هامة

يجب أن نشير إلى أننا لاحظنا أن طريقة الخطوتين تعاني من عدم استقرار عددي ناتج عن غياب الشروط المفروضة على تشكيل المعادلات الخطية في الخطوة الأولى. في الواقع، ينتج عدم الاستقرار عن الاستخدام المباشر للإحداثيات بكسل للنقاط المقاسة على الصورة و من غياب التجانس في هذه الإحداثيات. و بهدف تجاوز هذه المشكلة، قمنا بفرض قيود على الإحداثيات المتجانسة للنقاط المقاسة في الصورة وهي عبارة عن انسحابات و وضع على المقياس للإحداثيات بكسل المتجانسة للنقاط المقاسة على الصورة كمايلي :

إن مبدأ نظام إحداثيات البكسل موجود في الزاوية العلوية اليسرى، لذلك طبقنا انسحاباً على إحداثيات النقاط المقاسة بحيث يصبح المبدأ هو مركز الصورة. و قد كان للانسحابات القيم الآتية :

$$\left( \frac{-X_{image}}{2}, \frac{-Y_{image}}{2} \right)$$



قمنا بوضع الإحداثيات على مقياس تقريبي للإحداثيات المتجانسة. في الواقع، يتم تحديد القيمة الثالثة للإحداثيات المتجانسة (w) بحيث تساوي نصف قيم بعد الصورة مقدراً بالبكسل.

تعطى نتائج المعايرة في هذا البرنامج بالبكسل وليس بالمليمتر مما اضطرنا إلى تحويلها عبر حساب أبعاد البكسل الواحد بالمليمتر. في الحقيقة تم حساب أبعاد البكسل الواحد من خلال تقسيم أبعاد الصورة بالمليمتر على عدد البكسلات في كل اتجاه. وبعد الحساب وجدنا أن طول البكسل بالمليمتر في صورة الهاتف النقال Samsung GT-18262 هي 0.0013184375 mm.

الجدول (3). المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Samsung GT-18262.

الانحراف المعياري	القيمة	القيمة	المعامل	الهاتف النقال
4.2e-004 mm	3.171195 (mm)	2405.26768 (بكسل)	البعد المحرق	Samsung GT-18262
3.9e-004 mm	1.634768 (mm)	1239.92796 (بكسل)	Xp	
3.7e-004 mm	1.268321 (mm)	961.988270 (بكسل)	Yp	
1.600e-004	-0.08710		K1	
10.00e-005	-0.00036		K2	
غير متاحة			K3	
			P1	
			P2	

تم تكرار العمل باستخدام الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra ولكن باستخدام 4 صور فقط. في الواقع أردنا من تخفيض عدد الصور معرفة تأثير هذا العدد على نتائج المعايرة. بعد إنجاز المعايرة حصلنا على النتائج التالية (طول البكسل لصور هذا الهاتف بالحساب هو 0.0011880490 mm) :

الجدول (4). المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra.

الانحراف المعياري	القيمة	القيمة	المعامل	الهاتف النقال
4.1e-004 mm	4.596249 (mm)	3868.73733 (بكسل)	البعد المحرق	Sony Xperia T2 Ultra
3.9e-004 mm	2.388480 (mm)	2010.42271 (بكسل)	Xp	
3.5e-004 mm	1.879812 (mm)	1582.26791 (بكسل)	Yp	
-4.822e-003	-0.01846		K1	
1.250e-005	-0.00149		K2	
غير متاحة			K3	
			P1	
			P2	

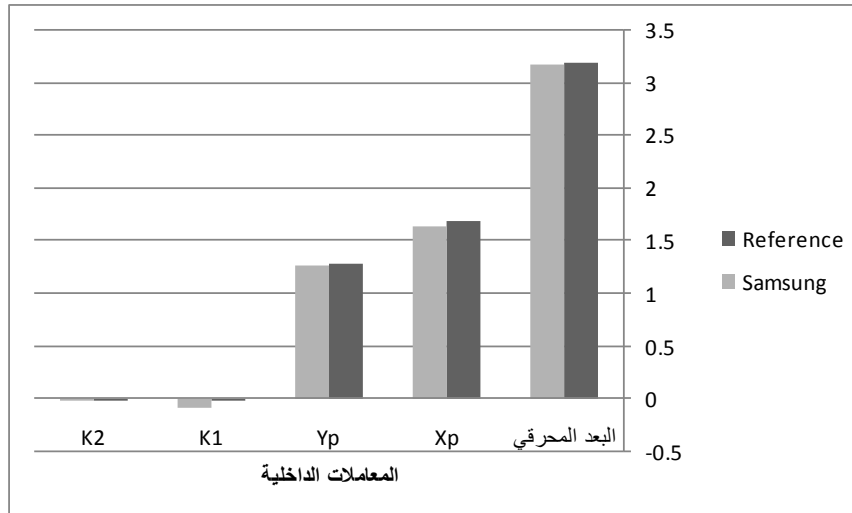
## مقارنة النتائج

سنعتبر أن القيم المرجعية للمعاملات الداخلية لآلات التصوير المعايرة هي التي حصلنا عليها بأسلوب المساحة التصويرية وذلك نظراً لاستقرار هذا الأسلوب من وجهة نظر رياضية. نعرض في الجدول (5) و الشكل (9) مقارنة القيم المرجعية للمعاملات الداخلية لآلة تصوير الهاتف النقال Samsung GT-18262 مع معاملاته التي تم

الحصول عليها بأسلوب الرؤية بمعونة الحاسب. كما نعرض في الجدول (6) و الشكل (10) نفس المقارنة ولكن لآلة تصوير الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra.

الجدول (5). مقارنة المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Samsung GT-18262 مع القيم المرجعية.

المعامل	القيمة المرجعية (مسح تصويري)	القيمة المحسوبة (رؤية بمعونة الحاسب)	الفرق	الفرق (%)
البعد المحرقى	3.193729 mm	3.171195 (mm)	0.022534 (mm)	2.3
Xp	1.683536 mm	1.634768 (mm)	0.048768 (mm)	4.9
Yp	1.283445 mm	1.268321 (mm)	0.015124 (mm)	1.5
K1	-8.02E-02	-0.0871	6.95E-03	0.7
K2	-2.3490e-004	-0.00036	0.00013	-0.01
K3	2.300e-005	غير متاحة		
P1	1.6920e-004			
P2	-2.7960e-004			

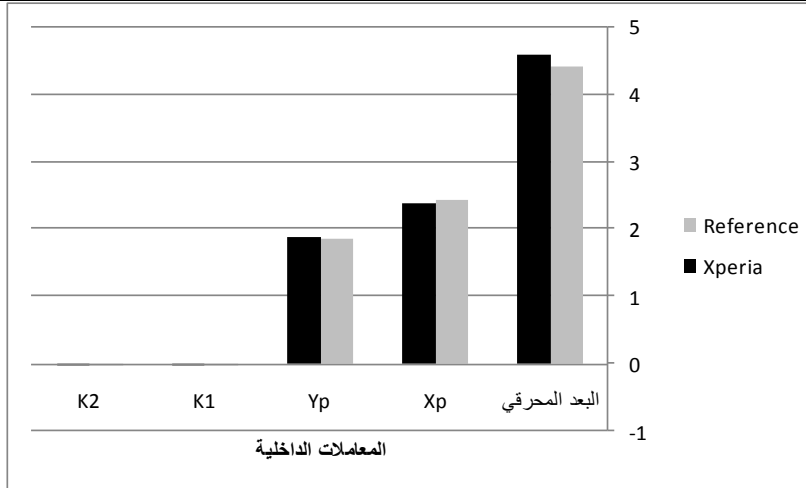


الشكل (9). مقارنة المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Samsung GT-18262 مع القيم المرجعية.

الجدول (6). مقارنة المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra مع القيم المرجعية.

المعامل	القيمة المرجعية (مسح تصويري)	القيمة المحسوبة (رؤية بمعونة الحاسب)	الفرق	الفرق (%)
البعد المحرقى	4.432500 mm	4.596249 (mm)	-0.163749 (mm)	16.4
Xp	2.438166 mm	2.388480 (mm)	0.049686 (mm)	5

1.5	-0.015023 (mm)	1.879812 (mm)	1.864789 mm	Yp
1.4	0.013853	-0.01846	-4.607e-003	K1
0.16	0.001621	-0.00149	1.313e-004	K2
		غير متاحة	5.229e-005	K3
			1.114e-004	P1
			1.864e-004	P2



الشكل (10). مقارنة المعاملات الداخلية (المعايرة) لآلة تصوير الهاتف النقال Sony Xperia T2 Ultra مع القيم المرجعية.

نلاحظ من الجداول والأشكال السابقة مايلي :

1. قيم التزيغات نصف القطرية كبيرة نسبياً في أسلوب المعايير وهذا مبرر بالنوعية البصرية المتواضعة للعدسات المستخدمة في آلة التصوير (مقارنةً بنوعية العدسات في آلات التصوير المتريّة المستخدمة في تطبيقات المساحة التصويرية القريبة).
2. يتيح لنا أسلوب المعايير بالمسح التصويري تحديد معاملات تزيغات لا يعالجها أسلوب المعايير بالرؤية بمعونة الحاسب (المعاملات K3, P1, P2). في واقع الأمر، إن إدخال هذه المعاملات إلى النموذج الرياضي للمعايرة سيجعل درجة تعقيده كبيرة جداً واستقراره الرياضي غير مضمون على خلاف طريقة المعايير الذاتية المتبعة في المساحة التصويرية.
3. نلاحظ تأثير عدد الصور المستخدمة على نتائج المعايرة بالرؤية بمعونة الحاسب حيث زادت الفروقات بين القيم المرجعية و القيم المحسوبة للمعاملات الداخلية بتناقص عدد الصور (من 6 إلى 4 صور).
4. نجح أسلوب المعايير بالرؤية بمعونة الحاسب إلى حد كبير في تحديد المعاملات الداخلية الأهم : بعد محرفي وإحداثيات النقطة الرئيسية بدقة مقبولة.

## الاستنتاجات والتوصيات

### الاستنتاجات

- بالاستناد إلى الدراسة النظرية المقدمة حول معايرة آلات التصوير الرقمية بالاعتماد على أسلوب المسح التصويري وأسلوب الرؤية بمعونة الحاسب والتطبيق العملي للدراسة، نستنتج مايلي :
1. أسلوب المسح التصويري أكثر استقراراً ويعطي نتائج أدق وذلك بسبب شمولية نموذج الرياضياتي. ولكنه بالمقابل يتطلب عدداً كبيراً من الصور مقارنةً بأسلوب الرؤية بمعونة الحاسب.
  2. نجاح أسلوب الرؤية بمعونة الحاسب مرتبط بعدد الصور الملتقطة لشبكة المعايرة وتوجيهها.
  3. نتائج المعايرة بأسلوب الرؤية بمعونة الحاسب جيدة ويمكن اعتمادها للعديد من التطبيقات التي تسعى إلى اقتطاع معلومات مترية من الصور الملتقطة.
  4. إن مشكلة تطبيع الإحداثيات *Coordinates normalization* في طريقة الرؤية بمعونة الحاسب (أي الانتقال من النظام بكسل إلى نظام مترية) تحتاج إلى بحث أوسع. وبالرغم من نجاح الطريقة التي اقترحناها لحل هذه المشكلة، فهي طريقة تقريبية.
  5. يعتمد أسلوب المسح التصويري على استخدام إحداثيات نقاط الصورة المعرفة بالنسبة للنقطة الرئيسية للصورة أما أسلوب الرؤية بمعونة الحاسب فيتعامل مباشرةً مع إحداثيات البكسل وهذا يعطيه نقطة قوة بالنسبة للأسلوب الأول.
  6. بيّنت الاختبارات أن آلات التصوير المرفقة مع الهواتف النقالة واعدة جداً في مجال المساحة التصويرية حيث يمكن لهذا النوع من آلات التصوير أن يشكل مع برامج تجارية رخيصة للمعايرة و النمذجة ثلاثية الأبعاد التكاليف نظاماً متكاملًا للمسح التصويري.

### التوصيات

نوصي باستخدام أسلوب المعايرة بالرؤية بمعونة الحاسب في تحديد المعاملات الداخلية لآلات التصوير الرقمية نظراً لسهولة تطبيقها مقارنةً بطرائق احترافية أخرى ونظراً للنتائج المشجعة التي تعطيها. كما نوصي باستخدام آلات تصوير الهواتف النقالة بعد معايرتها في تطبيقات المسح التصويري القريب التي لا تتطلب دقة عالية جداً.

## المراجع

- [1] Duane C. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, 1971.
- [2] W. Faig. Calibration of close-range photogrammetry systems: Mathematical formulation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(12):1479–1486, 1975.
- [3] Olivier Faugeras, Tuan Luong, and Steven Maybank. Camera self-calibration: theory and experiments. In G. Sandini, editor, *Proc 2nd ECCV*, volume 588 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 321–334, Santa Margherita Ligure, Italy,



- [4] S. Ganapathy. Decomposition of transformation matrices for robot vision. *Pattern Recognition Letters*, 2:401–412, December 1984.
- [5] J.J. More. The levenberg–marquardt algorithm, implementation and theory. In G. A. Watson, editor, *Numerical Analysis*, Lecture Notes in Mathematics 630. Springer–Verlag, 1977.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000.
- [7] Richard Hartley. Self–calibration from multiple views with a rotating camera. In J–O. Eklundh, editor, *Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision*, volume 800–801 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 471–478, Stockholm, Sweden, May 1994. Springer–Verlag.
- [8] Richard I. Hartley. An algorithm for self calibration from several views. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 908–912, Seattle, WA, June 1994. IEEE.
- [9] P. Sturm and S. Maybank. On plane–based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 432–437, Fort Collins, Colorado, June 1999. IEEE Computer Society Press.
- [10] Q.–T. Luong and O.D. Faugeras. Self–calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices. *The International Journal of Computer Vision*, 22(3):261–289, 1997.
- [11] S. J. Maybank and O. D. Faugeras. A theory of self–calibration of a moving camera. *The International Journal of Computer Vision*, 8(2):123–152, August 1992.
- [12] T. Okatani and K. Deguchi. Autocalibration of projector–screen–camera system: Theory and algorithm for screen–to–camera homography estimation. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision*, pages 774–781, Nice, France, October 2003. IEEE Computer Society Press.
- [13] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 22(11), pp. 1330–1334. 2000.
- [14] Tsai, R.Y. A versatile camera calibration technique for high–accuracy 3D machine vision metrology using off–the–shelf TV cameras and lenses. *IEEE Int. Journal Robotics and Automation*, Vol. 3(4), pp. 323–344.1987.

- [15] Heikkilä, J. and Silven, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. CVPR97.1997.
- [16] Clarke, T.A. and Fryer, J.G. The development of camera calibration methods and models. The Photogrammetric Record, Vol. 16(91), pp. 51-66. 1998.
- [17] Fraser, C.S. Photogrammetric camera component calibration. A review of analytical techniques. In 'Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision', Gruen and Huang (Eds.), Springer Series in Information Sciences 34, pp.95-121. 2001.
- [18] EOS SYSTEMS.. *User Manuel of PhotoModeler Pro5.1*. Canada, 2002.