

Study and Analysis The Effect of Camera Calibration Methods on Quality of Stereo Images Rectification

Dr. Al Samawal Saleh*
Batoul Khalil**

(Received 12 / 3 / 2023. Accepted 20 / 9 / 2023)

□ ABSTRACT □

Stereo calibration and rectification are considered to be one of the most important pre-steps in computer vision, virtual reality and 3D reconstruction applications. Fisheye lenses, which has a large Field of View, have been receiving increasing attentions in recent years. But these lenses add a high amount of distortion to the images. Calibration is also a must when rectifying stereo image pairs. Rectification makes the correspondence done only along the x-axis of the rectified images.

Because only few researches compared calibration algorithms and their impact on stereo image rectification. This paper presents a study and analysis of two state of the art calibration algorithms which are Scaramuzza algorithm which suggests a generic camera model to calibrate all kinds of cameras. And Bouguet algorithm that is based on Bouguet's work on calibration for pinhole camera model with the addition of some changes in distortions modeling. The performance evaluation of the algorithms have been done based on subjective measures using GIMP program. While the objective performance evaluation was done by studding mean reprojection error parameter and mean square rectification error parameter (MSRE). The results showed that Bouguet algorithm is more accurate and flexible, as it gave better results in stereo image rectification.

Keywords: stereo system, camera calibration, stereo rectification, fisheye lens, Bouguet algorithm, Scaramuzza algorithm.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: a.saleh@free.fr

**Master student , Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering , Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: batoul.khalil@tishreen.edu.sy

دراسة وتحليل تأثير خوارزميات معايرة الكاميرا على جودة تقويم الصور المجسمة

د. السموعل صالح*

بتول خليل**

(تاريخ الإيداع 12 / 3 / 2023. قبل للنشر في 20 / 9 / 2023)

□ ملخص □

تعد مرحلتا المعايرة والتقويم المجسم من أهم المراحل في تطبيقات الرؤية الحاسوبية والواقع الافتراضي وإعادة البناء ثلاثي البعد. حظيت عدسات عين السمكة (fisheye)، التي تتمتع بمجال رؤية كبير، باهتمام متزايد في السنوات الأخيرة، ولكن هذه العدسات تضيف قدراً كبيراً من التشويه للصور. وعلى الرغم من كون خطوة المعايرة أمراً لا بد منه قبل عملية التقويم المجسم ومن كون عملية التقويم تسهل خطوة المطابقة المجسمة إلى بحث في اتجاه المحور x فقط بين زوجي الصورة المقومتين. إلا أن هناك القليل من الأبحاث التي قارنت بين خوارزميات المعايرة وأثرها على تقويم الصور المجسمة. لذلك تم في هذه الورقة دراسة وتحليل أداء كل من خوارزمية Scaramuzza التي افترضت نموذج عام للكاميرا لمعايرة كل أنواع الكاميرات و خوارزمية Bouguet التي اعتمدت على نموذج الكاميرا ذات الثقب مع إضافة نماذج الضجيج. تم تقييم أداء كل خوارزمية وفق معيار شخصي بالاعتماد على برنامج GIMP ووفق معيار موضوعي بدراسة بارامتر إعادة الاسقاط وبارامتر خطأ التقويم التربيعة الوسطي. وقد أظهرت النتائج بأن خوارزمية Bouguet أكثر دقة حيث أعطت نتائج أفضل في تقويم الصور المجسمة.

الكلمات المفتاحية: النظام المجسم ، معايرة الكاميرا ، التقويم المجسم ، عدسات عين السمكة ، خوارزمية Bouguet ، خوارزمية Scaramuzza.



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

* استاذ، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

a.saleh@free.fr

**طالبة ماجستير، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

batoul.khalil@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تعتبر الرؤية الحاسوبية إحدى أهم تطبيقات علم الحاسوب، تهدف إلى بناء تطبيقات ذكية قادرة على فهم محتوى الصور كما يفهمها الانسان. تتضمن مهام الرؤية الحاسوبية طرقاً للحصول على الصورة الرقمية ومعالجتها وتحليلها وفهمها واستخراج البيانات للحصول على وصف للعالم الخارجي. يعتبر نظام الرؤية المجسمة أحد أشهر تطبيقات الرؤية الحاسوبية. يهدف هذا النظام إلى الاستفادة من معلومات العمق التي يتم استخراجها بين زوجي الصورة المجسمة، في تطبيقات القيادة الذاتية وإعادة البناء ثلاثي الأبعاد وتطبيقات الواقع الافتراضي. أولى الخطوات الأساسية في نظام الرؤية المجسمة هي معايرة الكاميرا والتقويم المجسم. تعمل المعايرة على استخلاص معلومات القياس ثلاثية البعد من صور ثنائية البعد حيث يتم استخدام بارامترات النظام المجسم الخارجية في حساب معلومات العمق، بينما يتم استخدام بارامترات المعايرة في تقويم زوج الصورة المجسمة الملتقطة، وتهدف عملية التقويم المجسم إلى تسهيل عملية البحث عن النقاط المتقابلة بين زوج الصورة المجسمة بحيث تجعل النقاط المتقابلة تقع على المحور لنفسه أي يختلفان في قيمة x فقط وبالتالي تسريع في عملية المطابقة المجسمة [1].

في السنوات الاخيرة ازداد الاهتمام بالكاميرات وحيدة الاتجاه ذات مجال الرؤية الواسع، واستخدمت في تطبيقات الرؤية الحاسوبية والواقع الافتراضي مثل مؤتمرات الفيديو والروبوتات والقيادة الذاتية [2]. وهناك عدة أنواع للكاميرا وحيدة الاتجاه مثل الكاميرات الانكسارية التي تستخدم عدسات ذات أشكال معينة مثل عدسة عين السمكة *fish-eye* ويصل مجال الرؤية لها تقريباً إلى 180 درجة، والكاميرات الانكسارية الانعكاسية التي يضاف فيها للكاميرا مرآة ذات شكل معين كقطع مكافئ أو بيضوي حيث توفر مثل هذه الكاميرات مجال رؤية 360 درجة في المستوى الأفقي و100 درجة في المستوى العمودي. لكن مع هذه الكاميرات لا يمكن استخدام نموذج الكاميرا ذات الثقب المستخدم مع الكاميرات ذات مجال الرؤية الصغير والذي يعتمد على الإسقاط المنظوري لنقاط المشهد، لأنه في حال استخدم هذا النموذج مع الكاميرات ذات مجال الرؤية الكبير سيكون مستوي الصورة الناتج هو مستوي لانهائي حيث ستكون مسافة النقطة في مستوي الصورة عن النقطة الرئيسية في المستوي لانهائي عندما تكون زاوية السقوط بين الشعاع البصري الوارد والمحور الرئيسي تقترب من 90 درجة، ففي حال استخدم نموذج الكاميرا ذات الثقب في هذا النوع من الكاميرا سيحصل تشوه كبير [3]. لذلك ظهرت العديد من الدراسات التي افترضت نماذج اسقاط معينة تبعاً لنوع الكاميرا، وأظهرت نتائج جيدة في المعايرة ولكنها محدودة بنوع معين لا يمكن استخدامها مع كاميرا من نوع آخر. وظهرت دراسات افترضت نموذج عام يتناسب مع كل أنواع الكاميرات مثل نموذج [4] Mei و [5] Scaramuzza و [6] Kannala، بالإضافة إلى الدراسة التي قدمها [7] Bouquet حيث عدل على خوارزميته لتصبح قادرة على معايرة الكاميرات ذات مجال رؤية واسع مثل عدسات عين السمكة. ومع قلة الأبحاث التي قارنت بين خوارزميات المعايرة قدمنا أولاً في هذه الدراسة دراسة نظرية لكل من خوارزميتي Bouquet و Scaramuzza ومن ثم تم استخدامنا بارامترات كل خوارزمية لتقويم زوج من الصور المجسمة. حيث استخدمنا ثلاثة مجموعات بيانات، تحوي كل مجموعة على عدة أزواج من الصور المجسمة ملتقطة بواسطة نظام مجسم ذو عدستي عين السمكة، وطبقنا خوارزميتي Bouquet و Scaramuzza كل على حدى. تمت دراسة جودة التقويم لكل خوارزمية بالاعتماد على معيارين شخصي ومعيارين. وقد أظهرت نتائج متوسط خطأ الإسقاط ونتائج بارامتر خطأ التقويم التريبيعي الوسطي تفوق خوارزمية Bouquet في مجموعات البيانات الثلاث. وقد توافقت نتائج التقييم الموضوعي مع نتائج تقييمنا الشخصي لجودة التقويم اعتماداً على برنامج GIMP.

أهمية البحث وأهدافه :

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحليل أداء خوارزميتي Bouguet و Scaramuzza في معايرة مجموعة بيانات مجسمة ومقارنة أدائهما وجودة كل منهما في تقويم الصور المجسمة. وتكمن أهمية هذا البحث بسبب قلة الأبحاث التي قارنت بين أداء هاتين الخوارزميتين من جهة وبسبب أهمية خطوتي المعايرة والتقويم المجسم من جهة ثانية.

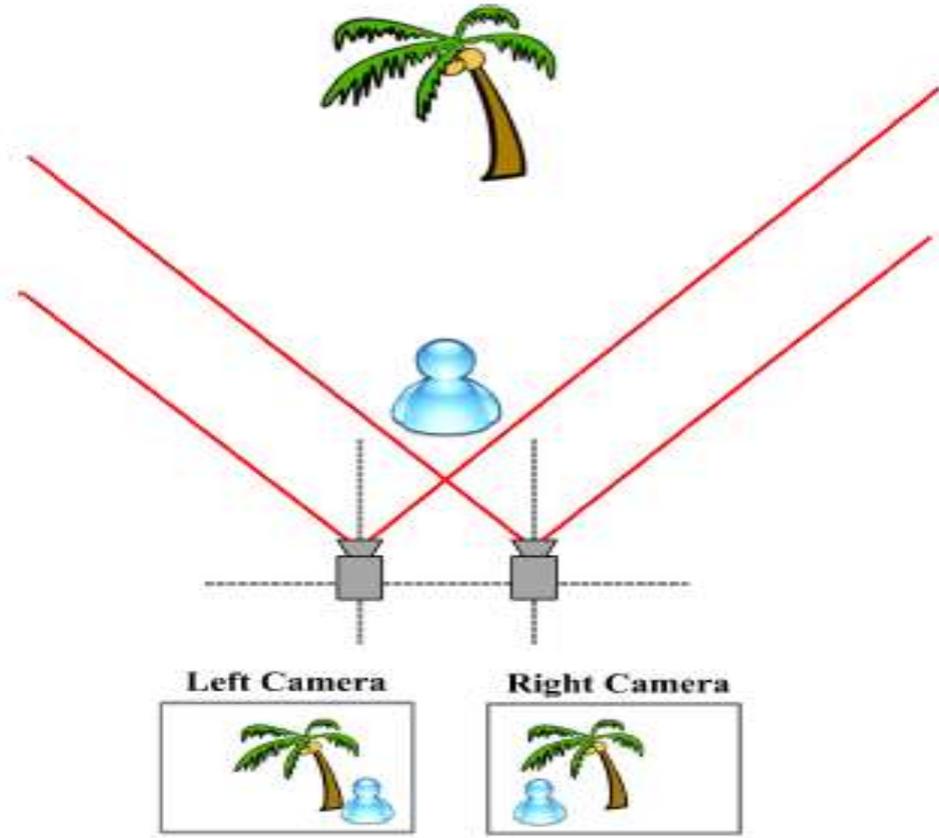
طرائق البحث ومواده:

قدمنا في هذه الورقة البحثية تعريف الرؤية المجسمة ودراسة نظرية عن معايرة الكاميرا ونموذج الكاميرا ذات الثقب، وعملية تقويم الصورة المجسمة ودراسة لخوارزميتي Bouguet و Scaramuzza . تضمن التطبيق العملي استخدام برنامج MATLAB من أجل تطبيق الخوارزميتين اعتماداً على البرمجيات مفتوحة المصدر والمتاحة من قبل كل من الباحثين Scaramuzza و Bouguet. وهما [8] Scaramuzza toolbox و [7] Bouguet toolbox . كما تم استخدام ثلاث مجموعات بيانات تضم صوراً مجسمة ملتقطة بواسطة كاميرات مجسمة تضم عناصر معايرة مزودة بعدسات عين السمكة. وتم استخدام برنامج GIMP لتقييم جودة تقويم الصور المجسمة.

الرؤية المجسمة Stereo Vision:

تسمى أيضاً binocular vision أي رؤية ثنائية، وهي بالتعريف استخراج معلومات ثلاثية البعد 3D لمشهد من زوج من الصور مأخوذتين من نقطتين مختلفتين. عملية المعالجة هذه تسمى معالجة مجسمة stereopsis وتتم في الدماغ الذي يقوم بتركيب الصورتين اليمنى واليسرى من العين اليمنى واليسرى على التوالي، حيث يتم تصور البعد الثالث للأجسام من خلال صورتين (صورة لكل عين يمين ويسار) [9].

أما الرؤية الحاسوبية المجسمة Computer stereo vision: فهي أيضاً استخراج معلومات ثلاثية البعد 3D من زوجي صور (صورة يسرى وصورة يمنى) ولكن في حالة كون الصور رقمية مما يتيح تطبيق خوارزميات معالجة رقمية متقدمة على الصور. حيث تؤمن الصورتين اليسرى واليمنى (أو المرجعية Reference والهدف Target) تقدير البعد وذلك بالاعتماد على مفاهيم المثلثات في الرياضيات. ويبين الشكل (1) مثال عن نظام الرؤية المجسمة [9].



الشكل (1): يبين مثال عن نظام الرؤية المجسمة

ولتحقيق الرؤية المجسمة يلزم جهاز ليمن من الرؤية المجسمة ويسمى stereo rig، وهو جهاز لتركيب الكاميرتين على نظام 3D واحد، لإظهار صور أو فيديو مجسمة، ومن إحدى الأجهزة التي استخدمت سابقاً جهاز Holmes stereoscope الذي اخترع من قبل العالم Oliver Wendell Holmes والموضح بالشكل (2). اعتمد الجهاز على عدسات موشورية مثبتة على هيكل خشبي ليمن حمله باليد. بقي هذا الاختراع منتشر طوال القرن التاسع عشر كتطبيق مباشر لتحقيق الرؤية المجسمة [10].



الشكل (2): يبين جهاز Holmes stereoscope

معايرة الكاميرا Camera Calibration:

مع التقدم التكنولوجي ازداد الطلب على المحتوى ثلاثي البعد واستخدامه في تطبيقات الرؤية الحاسوبية وإعادة البناء والواقعية الافتراضية [11]. تلعب معايرة الكاميرا دوراً مهماً في هذه التطبيقات، ودقة نتائج المعايرة واستقرار الخوارزمية تؤثر بشكل مباشر على دقة النتائج الناتجة عن عمل الكاميرا. لذلك تعد معايرة الكاميرا شرطاً أساسياً للعمل اللاحق، ويعتبر موضوع تحسين دقة المعايرة أحد أهم محاور البحث العلمي في الرؤية الحاسوبية.

معايرة الكاميرا هي العملية التي تهدف إلى إيجاد البارامترات الداخلية والخارجية لنموذج الكاميرا الذي يصف العلاقة الرياضية بين احداثيات نقطة في الفضاء ثلاثي البعد ومسقطها على مستوي صورة الكاميرا. تصف البارامترات الخارجية التحويل الذي يربط نقاط الكائن الثلاثية البعد في مستوي احداثيات العالم WCS مع مسقطها في مستوي احداثيات الكاميرا CCS وتشمل موقع واتجاه الكاميرا وتمثل بمصفوفة دوران R لتمثيل اتجاه الكاميرا ومصفوفة انتقال T لتمثيل موقع الكاميرا. أما البارامترات الداخلية فتمثل التحويل من مستوي احداثيات الكاميرا إلى مستوي احداثيات الصورة ICS، وتشمل البعد المحرقى على المحورين X, Y و (fx, fy) و النقطة الرئيسية Ox, Oy و حجم البيكسل على المحورين X, Y ومعامل الانحراف ومعاملات التشويه.

يمكن تقسيم طرق معايرة الكاميرا بشكل أساسي إلى نوعين. الأول يمثل المعايرة التي تعتمد على كائن مرجعي للمعايرة، وكائن المعايرة إما ان يكون أحادي البعد [12] أو ثنائي البعد [13] أو ثلاثي البعد [14]. تعتمد هذه الطريقة على التقاط مجموعة من الصور لكائن معايرة ذو بنية معروفة كلوح شطرنج. حيث تتم المعايرة بالاعتماد على مطابقة عدد من النقاط المتقابلة في الكائن مع مسقطها في الصورة. تتميز هذه الطريقة بدقة عالية في المعايرة وهي مناسبة للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية. أما النوع الثاني فيمثل المعايرة الذاتية للكاميرا، وهذه الطريقة لا تحتاج الى كائن معايرة، فقط تتطلب تحديد النقاط المتوافقة في عدة صور متسلسلة، بحيث يمكن معايرة الكاميرا بتوجيهها إلى البيئة المحيطة واختيار النقاط المهمة ومن ثم ملاحظتها في الصورة مع تحرك الكاميرا وليس من الضروري معرفة حركة الكاميرا. ومع ذلك، فإن نتائج المعايرة لهذه الطريقة تحوي أخطاء كبيرة وليست مناسبة للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية.

نموذج الكاميرا ذات الثقب Pinhole camera model :

يعتبر نموذج الكاميرا ذات الثقب النموذج الأبسط للكاميرا، وهو يفترض بأن نموذج الإسقاط المستخدم لنقاط المشهد في الفضاء ثلاثي البعد إلى مستوي صورة الكاميرا هو نموذج الإسقاط المنظوري [15].

لنكن النقطة A في مستوي الصورة مسقط النقطة L من المشهد الحقيقي، كما هو مبين في الشكل (3) الذي يصف نموذج الكاميرا ذات الثقب [15]. الإسقاط المنظوري من الفضاء ثلاثي البعد إلى مستوي الصورة يتضمن الانتقال بين أربع مستويات احداثية وهي:

- نظام احداثيات العالم Xw, Yw, Zw
- نظام احداثيات الكاميرا Xc, Yc, Zc
- مستوي الحساس x, y
- مستوي البيكسل u, v

تعمل معايرة الكاميرا على إيجاد التحويل بين مستوي البيكسل (u, v) ومستوي العالم (Xw, Yw, Zw) ، ويمكن تمثيل ذلك بالعلاقة (1) علماً أن الإحداثيات متجانسة :

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1) \quad [16]$$

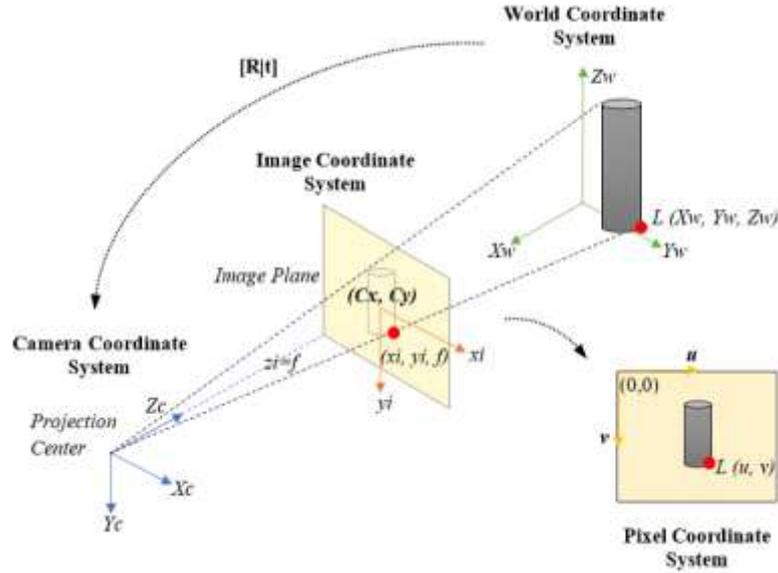
تمثل $M(3*4)$ مصفوفة اسقاط الكاميرا، $K(3*3)$ مصفوفة البارامترات الداخلية، $R(3*3)$ مصفوفة دوران الكاميرا بالنسبة لإحداثيات العالم الحقيقي وهي تمثل اتجاه الكاميرا، $T(3*1)$ مصفوفة انتقال الكاميرا بالنسبة لإحداثيات العالم الحقيقي وهي تمثل موقع الكاميرا. تعبر المصفوفتين R, T عن مصفوفة البارامترات الخارجية للكاميرا، أما K فهي مصفوفة الكاميرا الداخلية، وتمثل كل منهما بالمعادلة (2-3-4) على التوالي :

$$K = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2) \quad [16]$$

$$R = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3) \quad [16]$$

$$T = \begin{bmatrix} t1 \\ t2 \\ t3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(4) \quad [16]$$

هما fx, fy هما البعدين المحرقين على المحورين x, y على الترتيب، cx, cy هما إحداثيات النقطة الرئيسية بالبيكسل، S معامل التقييس .



الشكل (3): يمثل نموذج الكاميرا ذات الثقب

يعتبر هذا النموذج مناسب للكاميرات العادية ذات مجال رؤية صغير، لكن لهذا النموذج حدود وفرضيات لا يصلح استخدامه مع كل أنواع الكاميرات مثل عدسات عين السمكة ذات حقل الرؤية الكبير، لما تسببه من تشويه كبير جداً مقارنة بالكاميرات ذات العدسات العادية، لذلك تحتاج إلى نموذج اسقاط مختلف وطريقة معايرة مختلفة عن معايرة الكاميرات العادية.

التقويم المجسم Stereo Rectification:

تستخدم الرؤية المجسمة الحاسوبية لبناء جسم ثلاثي الابعاد من مشهد يتم تصويره من كاميرتين أو أكثر. فتعتمد على حساب التفاوت بين الصورتين، وبالتالي استخراج عمق النقاط بالاعتماد على التفاوت حيث إن العلاقة عكسية بين التفاوت والعمق. إحدى المشكلات التي تواجه هذه التقنية هي إيجاد التقابل بين بكسلات الصورتين اللتين هما مسقطين لنفس النقطة من المشهد، حيث يتم البحث ضمن فضاء ثنائي البعد 2D، وبالتالي وقت كبير وتعقيد أكبر. تم استخدام نظام مجسم أساسي (معياري) لحل هذه المشكلة. يعتبر النظام المجسم المعياري الحالة المثالية للنظام المجسم، ونسعى فيه للحصول على أفضل النتائج. حيث يتم ضبط اعدادات الكاميرتين بشكل مثالي في النظام المجسم المعياري بحيث يكون لهما:

- البعد المحرقي نفسه
- مستويي الصورتين للكاميرتين يقعان ضمن مستوي واحد
- مستويي الصورتين للكاميرتين لهما القياس نفسه
- خطوط الصورة او الخطوط القطبية متوازية وعلى استقامة واحدة
- المحاور البصرية للكاميرتين متوازية

يقدم النظام المجسم المعياري نتائج أفضل لكونه يسهل عملية البحث عن النقاط المتقابلة في الصورتين حيث يتم البحث ضمن فضاء احادي البعد بدلاً من البحث ضمن فضاء ثنائي البعد وفق شرط الهندسة القطبية.

والهندسة القطبية هي هندسة إسقاطية بين صورتين وهي مستقلة عن بنية المشهد وتعتمد فقط على بارامترات الكاميرا الداخلية وموقعها. ظهرت هذه الهندسة بهدف تسهيل البحث عن النقاط المتقابلة في الصورتين من أجل المطابقة المجسمة.

بفرض لدينا نقطة في الفضاء P ومسقطها على الصورتين اليسرى واليمنى p_l, p_r على التوالي فإن الهندسة القطبية تهدف إلى إيجاد علاقة بين النقطتين p_l, p_r .

وتنص على أن كل نقطة في الصورة اليسرى يقابلها خط في الصورة اليمنى بحيث تكون النقطة المقابلة لها في الصورة اليمنى تقع على هذا الخط والذي يسمى بالخط القطبي (epipolar line (l)، والعكس صحيح أي من أجل كل نقطة في الصورة اليمنى p_r يقابلها خط في الصورة اليسار بحيث تكون النقطة المقابلة لها في الصورة اليسار تقع على هذا الخط والذي يسمى ب (epipolar line (l) [17]. وبالتالي ساعدت هذه الهندسة في عملية البحث عن النقاط المتقابلة إذ لا نحتاج للبحث عن النقطة المقابلة لنقطة في كامل الصورة وإنما نبحث فقط في الخط القطبي epipole line المقابل .

بفرض نقطة ثلاثية البعد من المشهد، مسقطها على مستويي الصورتين اليسار واليمين x_l, x_r على التوالي، فيكون وفقاً للنظام المجسم المعياري:

$$x_l = \frac{f}{Z} (X, Y) \quad \dots(5) \quad [17]$$

$$x_r = \frac{f}{Z} ((X - b), Y) \quad \dots(6) \quad [17]$$

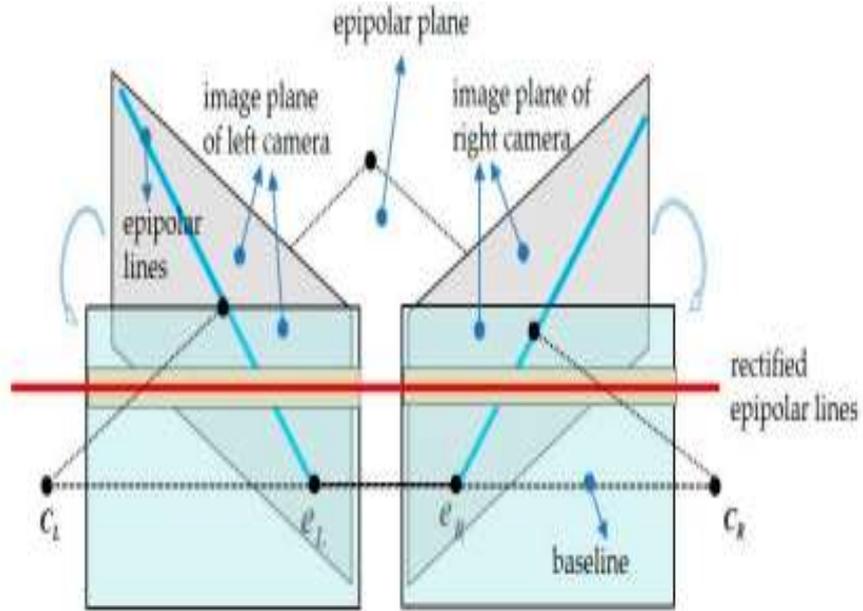
حيث b هو خط الأساس وهو الخط الذي يصل مركزي الكاميرتين و f البعد المحرقي .

عملياً من الصعب الحصول على نظام مجسم كالنظام المجسم المعياري ولكن يمكن تطبيق عملية تقويم على الصورتين بحيث تبدوان بعد التقويم وكأنهما التقطتا من النظام المجسم المعياري. بعد عملية التقويم تصبح البكسلات

المتقابلة تقع على خط مستوي واحد وكأنها تحركت حركة أفقية فقط، أي تختلف في قيمة x فقط ويكون لها نفس قيمة y ، وبالتالي أصبح فضاء البحث للنقاط المتقابلة أحادي البعد بدلاً من البحث ضمن فضاء ثنائي البعد. تتم مرحلة المعايرة قبل عملية التقويم لإيجاد بارامترات الكاميرتين الداخلية وموقع الكاميرا الأولى بالنسبة للأخرى، وبعد مرحلة المعايرة تأتي عملية التقويم التي تعني إيجاد كاميرتين افتراضيتين مصفوفة إسقاط كل منهما H ، H' من H ، H' على التالي حيث:

$$H = K [R \ T] \quad \dots(7) \quad [17]$$

H ، H' هما مصفوفتي إسقاط للكاميرتين الأساسيتين ونحصل عليهما من مرحلة المعايرة. الكاميرتين الافتراضيتين هما كاميرتين مثاليتين لا يوجد تشويه في نموذجهما، ومحاورهما البصرية متوازية، ومستويي الصورة لكل منهما ضمن مستوي واحد، أي أن التقويم يعمل على إعادة إسقاط الصورتين إلى مستويي الكاميرتين الافتراضيين، وبعد عملية التقويم يصبح مستويي الصورتين في مستوي واحد والخطوط القطبية متوازية ومستقيمة ونقطة القطب epipole في اللانهاية، وخط الأساس يصبح أفقياً موازياً للخطوط القطبية [17]. ويمثل الشكل (4) عملية التقويم [18].



الشكل (4) : يمثل عملية التقويم

طرق معايرة الكاميرا Camera calibration methods :

نظراً لأهمية المعايرة ظهرت العديد من الدراسات والأبحاث تناولت هذا الموضوع وبسبب التشوهات الكبيرة التي تسببها عدسات عين السمكة ظهرت العديد من الخوارزميات لمعايرة هذا النوع من العدسات، هناك خوارزميات اعتمدت على نموذج إسقاط محدد مثل Scaramuzza و منها اعتمدت على نموذج الكاميرا ذات الثقب نفسه مثل Bouquet ، و بسبب أهمية تلك الخوارزميتين المرجعيتين المذكورتين واستخدام كل منهما في العديد من الدراسات ، لذلك سنقدم دراسة ومقارنة لتلك الخوارزميتين وتحديد أي الخوارزمية الأكثر دقة والأكثر جودة في تقويم الصور المجسمة.

خوارزمية Bouquet:

قدم الباحث Bouquet طريقة لمعايرة عدسات عين السمكة بعد ملاحظة النتائج السيئة والتشوهات الكبيرة عند معايرتها باستخدام نموذج الكاميرا ذات الثقب [7]. فقد استخدم نموذج الكاميرا ذات الثقب نفسه مع تعويض التشوهات الحاصلة، واستخدم نفس خطوات المعايرة ونفس الخوارزميات المستخدمة في معايرة الكاميرا ذات الثقب مع وجود الفرق في نمذجة تابع التشويه وإضافة بعض الخطوات للتعويض عن التشوهات.

تتكون الخوارزمية من المراحل التالية :

- التقاط مجموعة من الصور لكائن المعايرة في مواضع مختلفة
- من أجل كل موضع لكائن المعايرة يتم استخلاص زواياه وإيجاد نقاط التقابل بينه وبين صورته وتتطلب النقر يدوياً على زواياه.

• مرحلة المعايرة وتأتي بعد مرحلة استخلاص الزوايا وتتم بشكل آلي حيث بالاعتماد على مجموعة نقاط التقابل يتم حل مجموعة معادلات خطية وإيجاد بارامترات الكاميرا الأولية الداخلية ثم الخارجية ومن ثم يتم تحسين قيم هذه البارامترات بطريقة لاخطية.

في نموذج الكاميرا ذات الثقب تم الأخذ بعين الاعتبار التشويه الشعاعي والمماسي في نموذج التشويه المستخدم أي عدد معاملات نموذج التشويه يساوي خمسة $(k1, k2, k3, p1, p2)$ ، حيث التشويه الشعاعي يعبر عنه بتابع كثير حدود من الدرجة السادسة وعملياً يؤخذ من الدرجة الرابعة.

أما في نموذج الكاميرا وحيدة الاتجاه يتم تجاهل التشويه المماسي تماماً، والتشويه الشعاعي يعطى أيضاً كتابع كثير حدود ولكن من الدرجة الثامنة، أي أن تابع التشويه dis يعطى بالعلاقة (8) :

$$dis = 1 + k1\rho^2 + k2\rho^4 + k3\rho^6 + k4\rho^8 \quad : \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \dots (8) \quad [7]$$

من الملاحظ أن تبديل تابع التشويه لن يغير كثيراً أي ما زال هناك حاجة لمزيد من التغيرات التي تعتبر طفيفة رغم ذلك . التغيرات هي الخطوات الإضافية المقدمة للتعويض عن التشوهات الكبيرة التي تسببها هذه الكاميرات بالإضافة إلى عملية تهيئة لبارامترات الكاميرا المختلفة، حيث يفرض في البداية أن النقطة الرئيسية هي مركز الصورة ويمكن تهيئة البارامترات بإدخالها من قبل المستخدم حيث يقدر النقطة الرئيسية بصرياً من الصورة الملتقطة ويقدر البعد المحرفي بالاعتماد على النشرة الفنية لمواصفات العدسة المستخدمة، وتتم المعايرة بشكل أفضل باستخدام البارامترات التي يدخلها المستخدم يدوياً، أما خطوة تعويض التشوهات فتتم قبل مرحلة كشف زوايا كائن المعايرة المرجعي وقبل مرحلة المعايرة باستخدام البارامترات المقدرة أولياً. أثبتت هذه الخوارزمية سهولة استخدامها ونتائجها الجيدة لذلك أصبحت تستخدم بكثرة في الكاميرات ذات عدسات عريضة الزاوية بالإضافة إلى استخدامها أساساً في الكاميرات ذات الثقب [19].

خوارزمية Scaramuzza:

قدم الباحث Scaramuzza طريقة لمعايرة الكاميرات وحيدة الاتجاه (مثل الكاميرات الانعكاسية الانكسارية والعدسات العريضة الزاوية وعدسات عين السمكة) المركزية (وهي الكاميرات التي تتقاطع فيها جميع الأشعة البصرية في نقطة واحدة والتي تسمى المركز البصري للكاميرا او نقطة رؤية فعالة واحدة). حيث أنه قدم نموذج عام لتابع اسقاط النقاط ثلاثية البعد في المشهد إلى مستوي الصورة بغض النظر عن نوع المرآة أو نوع العدسة المستخدمة، حيث أنه افترض تابع الاسقاط هو تابع بارامترية كثير الحدود على شكل منشور تايلور بحيث يتم ايجاد معاملاتهما عن طريق

حل مسألة التصغير للمربعات الصغرى خطياً بمرحلتين. اعتمد في خوارزميته على المعايرة باستخدام كائن المعايرة المرجعي فاستخدم نموذج مستوي لكائن المعايرة (أي البعد الثالث $z=0$) والنقط عدة صور له باتجاهات ومواقع مختلفة [5]. في نموذج الكاميرا وحيدة الاتجاه المركزي يتم تعريف مستويي احداثيات مميزين: مستوي الصورة (u',v') ونقاط هذا المستوي يعبر عنها بالبيكسل، ومستوي الحساس (u'',v'') ونقاطه يعبر عنها بالاحداثيات الميلمترية. ويمثل الشكل (5) كل من المستويين في الكاميرا الانكسارية الانعكاسية [5]، أما في عدسات عين السمكة يجب عكس إشارة u' لأنه لا يوجد سطح انعكاسي. كل الاحداثيات تعتمد المركز O مبدأ للاحداثياتها والمحور Z بنفس اتجاه محور الحساس. بفرض X نقطة ثلاثية الابعاد من المشهد، فتكون $u''=(u'',v'')$ مسقط هذه النقطة على مستوي الحساس والنقطة $u'=(u',v')$ مسقطها على مستوي الصورة، وكل من المستويين يرتبطان عبر التحويل التآلفي الذي يعبر عن عدم تطابق محور الحساس على محور العدسة والخطأ الناتج عن عملية الترقيم عند الانتقال من مستوي الحساس إلى مستوي الصورة كما هو ممتثل بالعلاقة (9):

$$u''=Au'+t \quad \dots(9) \quad [5]$$

يتم تعريف التابع g لتمثيل العلاقة بين النقطة u'' على مستوي الحساس مع الشعاع p الذي ينطلق من المركز باتجاه النقطة X ، ونعبر عن ما سبق بالمعادلة (10) :

$$\lambda \cdot p = \lambda g(u'') = PX \quad \dots(10) \quad [5]$$

حيث $X \in R^4$ يعبر عنها بالاحداثيات المتجانسة و $P \in R^{3*4}$ مصفوفة الاسقاط المنظورية. المعايرة تعني تحديد A, t وبارامترات التابع g وبالتالي نستطيع بعد المعايرة ان نعيد بناء اتجاه الشعاع الذي ينطلق من المركز O باتجاه النقطة ثلاثية البعد في المشهد من أي بكسل. نفرض التابع g كما في العلاقة (11):

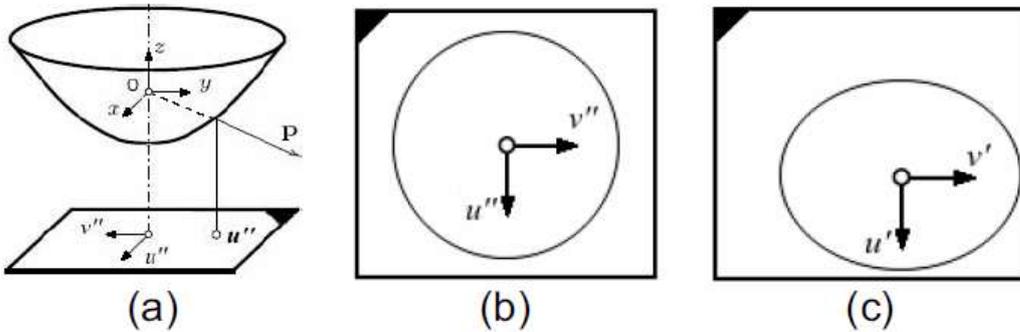
$$g(u'',v'') = (u'', v'', f(u'',v''))^T \quad \dots(11) \quad [5]$$

نختار التابع f بحيث يكون مناسب لكل أنواع الكاميرات والحساسات ويتم تعويض الفرق عن تطابق نقطة تركيز المرآة أو العدسة مع المركز البصري للكاميرا، وافترض على شكل منشور تايلور كما في العلاقة (12) :

$$f(u'',v'') = a_0 + a_1\rho'' + a_2\rho''^2 + \dots + a_n\rho''^n \quad \dots(12) \quad [5]$$

حيث معاملات التابع a_0, a_1, \dots, a_n و درجة التابع كثير الحدود هي بارامترات نموذج الكاميرا التي يجب حسابها ، ρ تعبر عن مسافة النقطة عن محور الحساس ، لذلك المعادلة (10) يمكن أن تكتب بالعلاقة (13):

$$\lambda \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \lambda g(Au' + t) = \lambda \begin{bmatrix} Au' + t \\ f(u'',v'') \end{bmatrix} = PX \quad ; \lambda > 0 \quad \dots(13) \quad [5]$$



الشكل (5): يمثل (a) نظام الاحداثيات في النظام البصري الانكساري الانعكاسي (b) مستوي الحساس (c) مستوي صورة الكاميرا

أثبتت هذه الخوارزمية سهولة استخدامها ولكن يبقى العائق الأساسي لهذه الخوارزمية هو مسألة الكشف عن الزوايا بشكل آلي، ففي الكثير من الحالات لا يتم الكشف بشكل صحيح وخصوصاً إذا كانت الصور ذات دقة منخفضة.

التطبيق العملي:

تم استخدام ثلاث مجموعات بيانات (مجموعة بيانات 1- مجموعة بيانات 2-مجموعات بيانات 3) وتطبيق خوارزميتي Scaramuzza و Bouguet على كل مجموعة بيانات. حيث احتوت كل مجموعة على عدد من أزواج الصور المجسمة التي تحوي على كائنات معايرة مرجعية على شكل لوح شطرنج مقسمة بالتساوي على مربعات سوداء وببضء تتكون من 9 مربعات على المحور x و 6 مربعات على المحور y . ويوضح الجدول (1) وصف مجموعات البيانات المستخدمة في البحث. بعد الحصول على بارامترات المعايرة لكل خوارزمية من أجل كل مجموعة بيانات يتم تقويم زوج من الصور المجسمة من كل مجموعة بيانات بالاعتماد على بارامترات المعايرة التي تم الحصول عليها سابقاً، وأخيراً نقارن دقة الخوارزميتين وتحديد أي الخوارزميتين الأفضل وأياً منهما ذات جودة أفضل لتقويم الصور المجسمة.

الجدول (1): يمثل وصف لمجموعات البيانات

مجموعة البيانات	عدد الصور المجسمة في المجموعة	الموقع الذي تم التحميل منه	الوصف
مجموعة البيانات 1	27 صورة يسرى و 27 صورة يمنى	https://github.com/abhileshborode/Stereo-depth-reconstruction	استخدمت في معايرة زوج من الصور المجسمة الملتقطة بنظام مجسم مجهز بعدستي عين السمكة ومن ثم تم الاستفادة من المعايرة لتقويم الصور المجسمة وبناء خريطة العمق ثم إعادة البناء ثلاثي البعد
مجموعة البيانات 2	14 صورة يسرى و 14 صورة يمنى	https://github.com/opencv/opencv	استخدمت لمعايرة نظام مجسم باستخدام مكتبة opencv
مجموعة البيانات 3	49 صورة يسرى و 49 صورة يمنى	https://github.com/realizator/stereopi-fisheye-robot	استخدمت لمعايرة زوج من الصور المجسمة ملتقطة بنظام مجسم مجهز بعدستي عين السمكة على ريبوت داخلي، وبعد المعايرة تم تقويم الصور المجسمة وبناء خريطة العمق للبيئة من أجل توجيه الروبوت.

تم استخدام برنامج الماتلاب MATLAB لتطبيق كل من Scaramuzza toolbox [8] و Bouguet toolbox [7]. يتم تنفيذ Scaramuzza toolbox في الـ MATLAB تسمح مجموعة الأدوات هذه للمستخدم (حتى المستخدم غير الخبير) بمعايرة الكاميرا وحيدة الاتجاه مهما كان نوعها. حيث تقدم طريقة للمعايرة سهلة الاستخدام وتمتاز بالميزات التالية:

- تتم فيها عملية استخلاص الزوايا بشكل آلي بدون تدخل المستخدم
- لا تتطلب معرفة مسبقة عن نوع المرآة في الكاميرا

- يتم ايجاد مركز الصورة بشكل آلي أيضاً حيث لا يوجد ضرورة أن تكون الحدود الخارجية الدائرية للمرآة مشاهدة في الصورة
- أما Bouquet toolbox فهي أداة تستخدم لمعايرة كاميرا واحدة أو زوج من الكاميرات في نظام مجسم، ويتم تشغيلها في الـ *MATLAB*، وهي تقدر بارامترات الكاميرا الداخلية والخارجية وبارامترات التشويه، وتستخدم لمعايرة كل من الكاميرا ذات الثقب والكاميرا ذات عدسة عين السمكة.
- تم استخدام معيارين شخصي وموضوعي لتقييم نتائج التقويم:
- 1- معيار تقييم موضوعي:

- بارامتر متوسط خطأ إعادة الإسقاط *Mean reprojection error*: يمثل بارامتر خطأ إعادة الإسقاط المسافة بين النقطة المسقط باستخدام تابع الإسقاط والنقطة المقاسة بالبيكسل وهذا البارامتر يعبر عن دقة معايرة الكاميرا، فكلما كان الخطأ أقل كلما كانت بارامترات المعايرة مقدره أفضل وبالتالي خوارزمية المعايرة أكثر دقة.
- استخدام بارامتر خطأ التقويم التربيعي الوسطي *Rectification Mean Square Error (RMSE)*: كما نعلم بعد عملية التقويم يجب أن تقع كل النقاط $p_k^i = (u_k^i, v_k^i)$ في الصورة اليسار مع مقابلاتها في الصورة اليمين $p_k^j = (u_k^j, v_k^j)$ على خطوط قطبية مستقيمة وموازية لمحور الأساس، أي من أجل $k=1, \dots, n$ عدد النقاط في الصورة يجب أن تكون $v_k^i = v_k^j$.
- يعطى خطأ التقويم التربيعي الوسطي بالمعادلة (14) [20]:

$$e^{i,j} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (v_k^i - v_k^j)^2} \quad \dots (14)$$

- 2- معيار تقييم شخصي باستخدام برنامج *GIMP*: إن برنامج *GIMP* هو اختصار لـ *GNU Image Manipulation Program*، يعتبر هذا البرنامج احد أدوات معالجة الصور المجانية والمتقدمة يستخدم للتعامل مع الصور وتحسينها والتعديل عليها، ومن أبرز امكانياته التعامل مع الصور على شكل طبقات، ويمكن العمل على كل طبقة على حدة، ويتيح امكانية معاينة الشكل الجديد للتعديل قبل اعتماده او حذفه.

النتائج والمناقشة:

1. نتائج التقويم:

تم تطبيق خوارزميتي *Bouquet & Scaramuzza* على كل من مجموعات البيانات المستخدمة، ومن ثم تم استخدام بارامترات كل خوارزمية لكل مجموعة لتقويم زوج من الصور من كل مجموعة، وتبين الجداول (2-3-4) نتائج التقويم

الجدول(2): يمثل نتائج تقويم زوج من الصور المجسمة لمجموعة البيانات 1

الخوارزمية	الصورة اليسرى قبل التقويم	الصورة اليسرى بعد تقويم	الصورة اليمنى بعد التقويم
Scaramuzza			



الجدول (3) : يمثل نتائج التقويم لزوج من الصور المجسمة لمجموعة البيانات 2

الصورة اليمنى بعد التقويم	الصورة اليسرى بعد اتقويم	الصورة اليسرى قبل التقويم	الخوارزمية
			Scaramuzza
			Bouguet

الجدول (4) : يمثل نتائج التقويم لزوج من الصور المجسمة لمجموعة البيانات 3

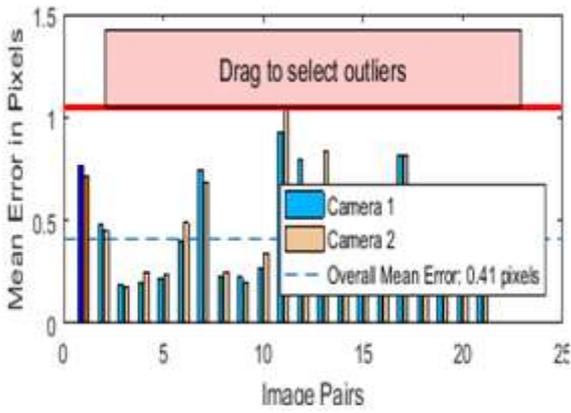
الصورة اليمنى بعد التقويم	الصورة اليسرى بعد اتقويم	الصورة اليسرى قبل التقويم	الخوارزمية
			Scaramuzza
			Bouguet

1-2-2- تقييم نتائج التقويم:

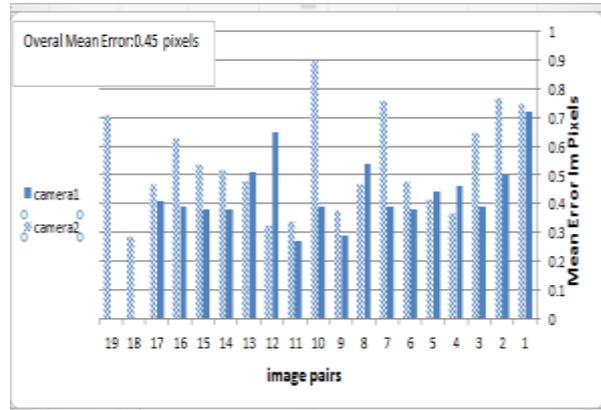
1-2-2-1- التقييم الشخصي باستخدام برنامج *GIMP*: تم فتح زوج من الصور المقومة باستخدام بارامترات Scaramuzza toolbox في برنامج *GIMP* والتعامل مع الصورتين المجسمتين المقومتين كطبقتين، وتحديد مستطيل في الصورة اليسار ومشاهدة انزياح هذا المستطيل على المحور Y في الصورة اليمين، وتم ملاحظة أن الانزياح على المحور Y عند استخدام Bouguet toolbox أصغر مقارنة بالانزياح على المحور Y عند استخدام Scaramuzza toolbox، وبالتالي التقويم باستخدام بارامترات *Bouguet toolbox* ذات جودة أعلى.

1-2-2-2- التقييم الموضوعي

■ بارامتر متوسط خطأ إعادة الإسقاط: تم تمثيل نتائج متوسط خطأ إعادة الإسقاط لمجموعتي البيانات 1 و 3 لكل موضع لكائن المعايرة من أجل كل من الخوارزميتين بالشكلين رقم (7-6)، تم حساب متوسط الخطأ الكلي ووضع قيمته إلى جانب المخطط .

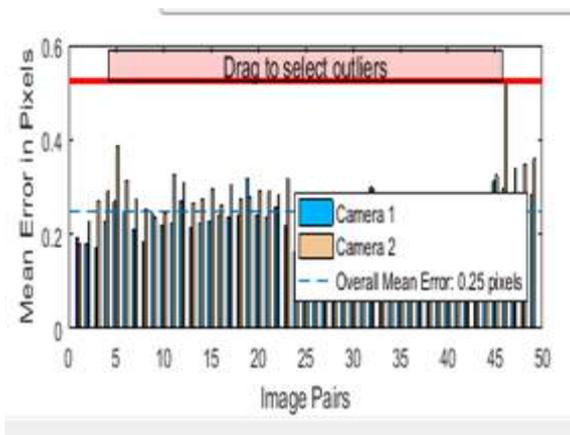


A

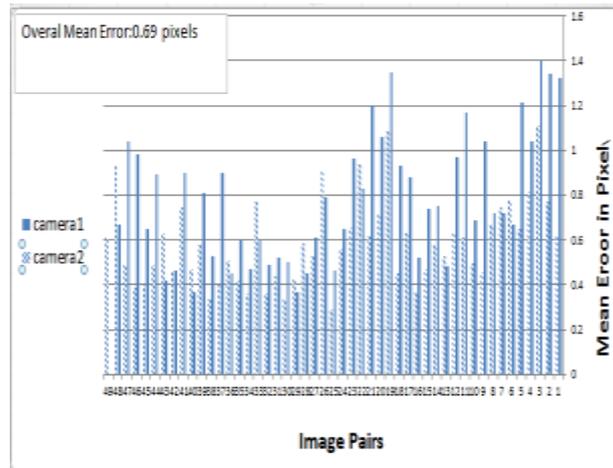


B

الشكل (6): يمثل متوسط خطأ إعادة الإسقاط لمجموعة البيانات 1 عند تطبيق A) Bouguet toolbox و B) Scaramuzza toolbox



A

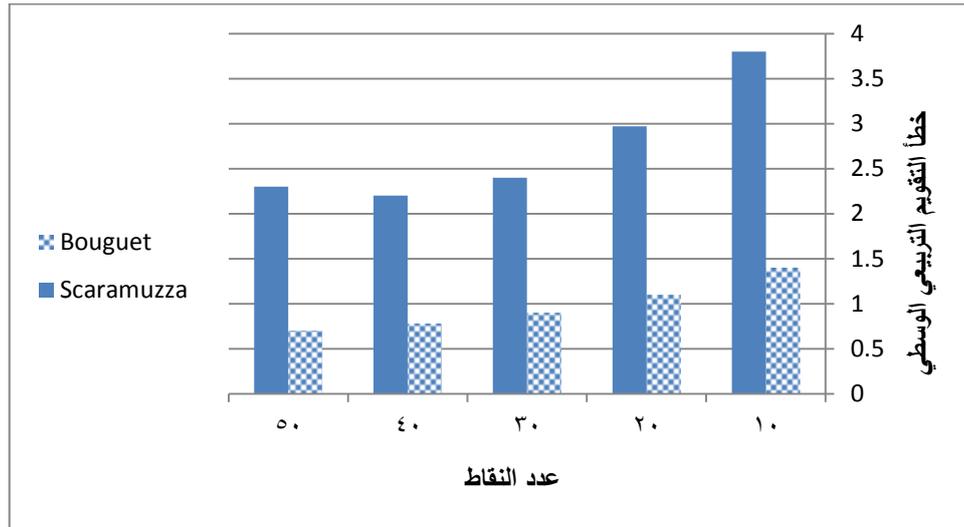


B

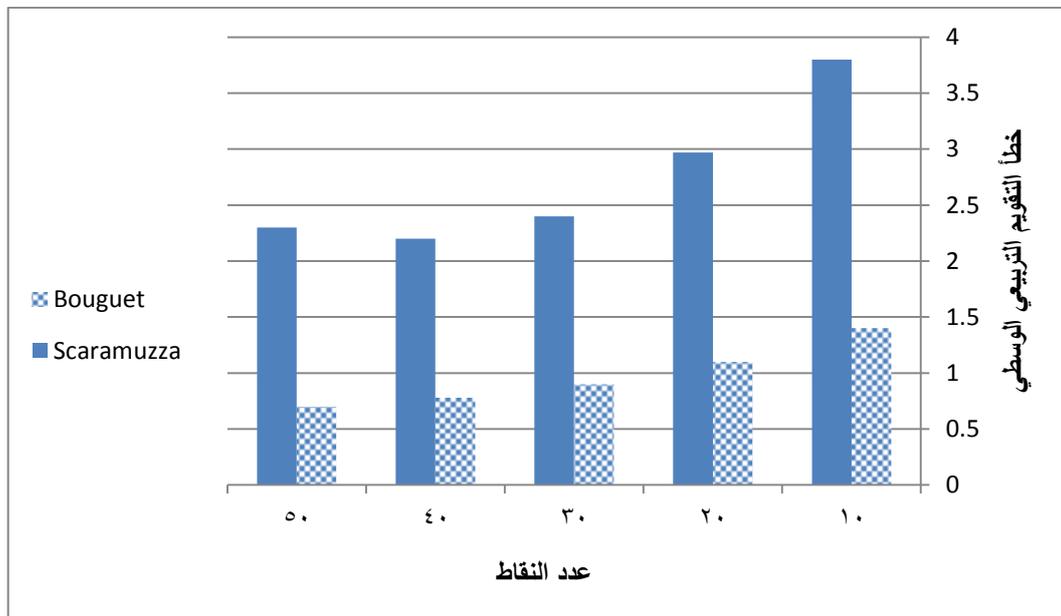
الشكل (7): يمثل متوسط خطأ إعادة الإسقاط لمجموعة البيانات 1 عند تطبيق A) Bouguet toolbox و B) Scaramuzza toolbox

من الشكلين (6 - 7) تلاحظ ان متوسط الخطأ عند *bouquet* لمجموعة البيانات 1 يساوي 0.41 ومتوسط الخطأ عند استخدام خوارزمية *Scaramuzza* هو 0.45 ، وكذلك لمجموعة البيانات 3 متوسط الخطأ عند *bouquet* (0.25) أصغر مما هو في *Scaramuzza* (0.69) وبالتالي يمكن القول إن *bouquet* أكثر دقة من *Scaramuzza*.

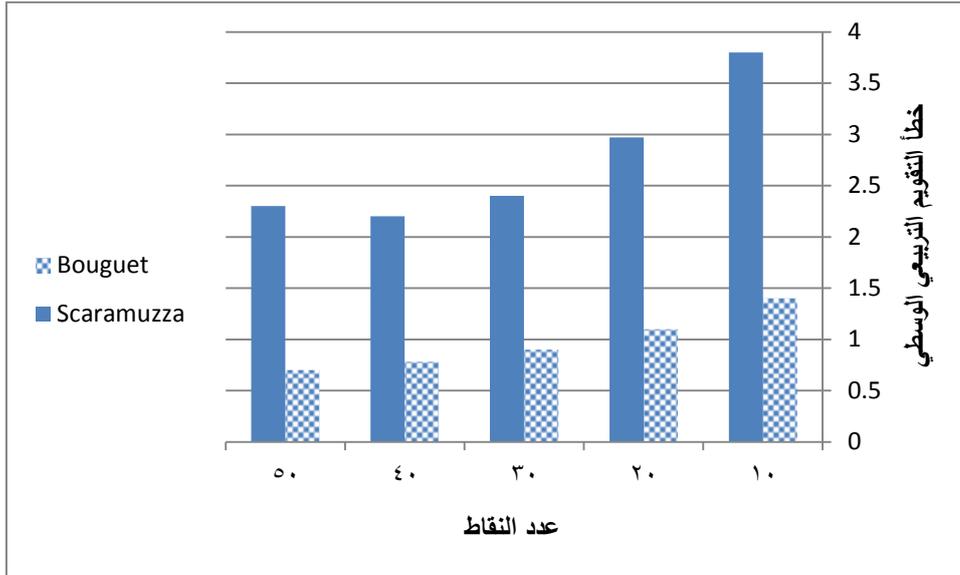
■ بارامتر خطأ التقويم التربيعي الوسطي (RMSE (Root Mean Square Error): تم دراسة بارامتر خطأ التقويم التربيعي الوسطي لأجل عدد مختلف من النقاط، وتظهر الاشكال (8-9-10) هذا الخطأ عند استخدام كل من *Bouquet* و *Scaramuzza* من أجل عدد مختلف من النقاط من أجل مجموعات البيانات الثلاث.



الشكل (8): خطأ التقويم التربيعي الوسطي لخوارزمتي *Bouquet* و *Scaramuzza* من أجل مجموعة البيانات 1



الشكل (9) : خطأ التقويم التربيعي الوسطي لخوارزمتي *Bouquet* و *Scaramuzza* من أجل مجموعة البيانات 2



الشكل (10) : خطأ التقويم التريبيعي الوسطي لخوارزميتي *Bouquet* و *Scaramuzza* من أجل مجموعة البيانات 3

من الأشكال (8-9-10) نلاحظ أن خطأ التقويم باستخدام *Bouquet toolbox* أقل منه عما هو عليه الحال عند استخدام *Scaramuzza toolbox*، وبالتالي يمكن القول أن *Bouquet* أفضل جودة في تقويم الصور المجسمة، وهذه النتيجة تتناسب مع النتيجة السابقة حيث كان متوسط خطأ إعادة الإسقاط أقل عند *bouquet* وبالتالي *bouquet* أكثر دقة وبارامترات المعايرة أكثر دقة بتقديرها، وبما إن التقويم يعتمد على بارامترات المعايرة لذلك من الطبيعي أن تكون جودة *bouquet* في التقويم أفضل.

وقد توافقت نتائجنا مع نتائج الدراسة [19] حيث قارنت بين عدة خوارزميات معايرة من بينها *Bouquet* و *Scaramuzza* واعمدت في التقييم على بارامتر خطأ إعادة الإسقاط وعلى دراسة خريطة التفاوت، وأكدت في نتائجها أن *Bouquet* أكثر دقة.

الاستنتاجات والتوصيات:

قدمنا في هذه الورقة البحثية دراسة نظرية عن خوارزميتي المعايرة *Bouquet* و *Scaramuzza*، ودرسنا أداء كل خوارزمية في تقويم الصور المجسمة، حيث إن عملية التقويم تعتمد على بارامترات المعايرة. ودرسنا أثر كل خوارزمية على جودة التقويم للصور الملتقطة بعدسات عين السمكة التي تتميز بمجال رؤية كبير بالاعتماد على التقييم الشخصي من خلال برنامج *GIMP*، حيث رأينا أن الفرق في قيمة y للنقاط المتقابلة عند استخدام *Bouquet* أصغر عما هو في *Scaramuzza*، واعتمدنا أيضاً على بارامتر خطأ التقويم التريبيعي الوسطي الذي أكد أن خوارزمية *Bouquet* أكثر دقة وتوافقت النتائج مع نتائج لدراسة سابقة [19]، ويمكن تفسير كون خوارزمية *Scaramuzza* أقل دقة بأنها تعتمد على الكشف الآلي للزوايا وبالتالي تسبب أخطاء كبيرة وخصوصاً في حال الصور ذات الدقة منخفضة.

References:

- [1] Wang.Y & Gong.X & Lin.Y and Liu.J. *Stereo calibration and rectification for omnidirectional multi-camera systems*, International journal of advanced robotic systems , Vol.9 ,2012.
- [2] Bogdan.O, Eckstein.V, Ramepu.F and Bazin.J. *DeepCalib : A deep learning approach for automatic intrinsic calibration of wide field-of-view cameras*, European Conference on Visual Media Production, London, United Kingdom, 2018.
- [3] Fasogbon. P and Fan. L. *Generic calibration of cameras with non-Parallel optical elements*, International conference on pattern recognition, Beijing, China, 2018.
- [4] Mei.C and Rives.P. *Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids*, INRIA,2004.
- [5] Scaramuzza.D & Martine.A and Siegwart.R. *A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion*, IEEE International conference on computer vision systems, 2006.
- [6] Kannala.J and Brandt.S.S . *A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fisheye lenses*, IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence, Vol.28,No.8,2006.
- [7] Bouguet.J.Y. *Camera calibration toolbox for Matlab*, Retrieved December 10,2022 from www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- [8] Scaramuzza.D & Martine.A and Siegwart.R. *A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras*, IEEE /RSJ International conference on intelligent robots and systems,Beijing,China,2006,5696-5701.
- [9] Mattoccia.S. *Stereo Vision: Algorithms and Applications*, University of Bologna, 2013.
- [10] C.Emmanouil."Comparison of open source stereo vision algorithms" Technological Educational Institute Of Crete,2015.
- [11] Gong.X, Lv.Y, Xu.X, Jiang.Z and Sun.Z. *High precision calibration of omnidirectional camera using iterative method*, IEEE Access,Vol.7,2019.
- [12] Jiang.T, Cheng.X and Cui.H. *Calibration method for binocular vision with large FOV based on normalized 1D homography*, Optik, Vol.202, 2020.
- [13] Kim.E.S and Park.S.Y. *Extrinsic calibration of a camera-LIDAR multi sensor system using a planar chessboard*, Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Zagreb, Croatia, 2019.
- [14] Lin.H, Feipeng.D and Shaoyan.G. *Research on multi-camera calibration and point cloud correction method based on three-dimensional calibration object*, Optics and Lasers in Engineering,Vol.115, 2019,32-41.
- [15] Fernandez.L & Avila.V and Goncalves.L. *A generic approach for error estimation of depth data from (stereo and RGB-D) 3D sensors*, Preprints,2017.
- [16] Trucco.E and Verri.A. *Introductory techniques for 3D computer vision*. Upper Saddle River,N.J, Prentice Hall,1998.
- [17] Hartly.R. *Theory and practice of projective rectification*, Int.Journal of Computer Vision, Vol.35, No.2, 1999,115-127.
- [18] Gu.F & Song.Z and Zhao.Z. *Single-shot structured light sensor for 3D dense and dynamic reconstruction*. Sensors,Vol.20, Issue.4,2020.
- [19] Ahn.J.H. *Calibration of various configuration of multiple cameras for driver assistance systems*, Auckland university of technology, 2010.
- [20] Guerchouche.R and Coldefy.F. *Camera calibration methods evaluation procedure for images rectification and 3D reconstruction*, WSCG 2008:16TH International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision,2008,205-210.