

تطوير نظام كشف محيطي فوق صوتي منخفض الكلفة لبناء خريطة ثلاثية الأبعاد للبيئة المحيطة بروبوت

م. مجد قاسم¹

م. سائر محمود² د. لؤي صالح³

الملخص

لا يزال بناء خريطة تموضع ثلاثية الأبعاد حول روبوت يشكل هدفاً صعباً للمعالج في مجال الروبوتات ذاتية القيادة، وذلك لتعقيد المسألة الرياضية أولاً، وصعوبة التنفيذ الفني ثانياً وارتفاع كلفة التجهيزات التقنية ثالثاً. وعندما يتخطى علم الروبوتات هذا الهدف الصعب ويحصل على خريطة محيطية ثلاثية الأبعاد ذات دقة كافية ومدى مقبول فإن أفقاً بحثياً جديداً سينفتح مقدماً إمكانات التمسّح وإيجاد المسار الأمثل والتوجيه وغيرها من قدرات التعامل مع البيئة الفيزيائية. يتوقف الحصول على نموذج دقيق للبيئة المجهولة المحيطة بروبوت على نوع وجودة الحساسات المستخدمة وهو ما يؤثر بشكل مباشر في كلفة وتعقيد النظام الروبوتي.

تم في هذا البحث تصميم وتنفيذ نظام كشف محيطي قادر على قراءة البيئة المحيطة المجهولة ضمن مدى محدد وتزويد النظام الروبوتي بنموذج ثلاثي الأبعاد عن البيئة المحيطة به. اعتمد النظام المصمم على مصفوفة من الحساسات فوق صوتية، نظراً لكلفتها المنخفضة، وبساطة العمليات التشغيلية اللازمة لقيادتها، وقدرتها على العمل في الظروف المناخية المختلفة. تم تركيب مصفوفة الحساسات على منصة قابلة للدوران حول الأفق وحول الشاقول وذلك بهدف إعطاء منظومة القياس إمكانية المسح المحيطي وتغطية كامل الفراغ أمام الروبوت. يقوم النظام بالاعتماد على قياسات مصفوفة الحساسات ببناء خريطة للبيئة المحيطة باستخدام خوارزميات الإشغال الشبكية Occupancy Grid والتي تم إنجازها باستخدام مكتبة الرسم ثلاثي الأبعاد Octomap.

قمنا في هذا البحث بتطوير خوارزمية تمثيل البيئة المحيطة 3D والاستفادة من الحركة الدورانية للمنصة لإعطاء قيم إشغال احتمالية للفراغ تنعكس على شكل تدرج لوني على الخريطة. تم تنفيذ الجزء البرمجي باستخدام مكتبات لغة ++C وضمن نظام ROS العامل على نظام التشغيل Ubuntu مما يجعله قابلاً للاستثمار لاحقاً في أغلب المنصات الروبوتية.

أظهرت نتائج تطبيق الخوارزمية المطورة على قياسات حقيقية قدرة نظامنا المطور على نمذجة البيئة المحيطة وفق بنى معطيات شبكية معيارية قابلة للاستثمار في مهام الروبوت اللاحقة مثل الملاحة وإيجاد المسار الأمثل.

الكلمات المفتاحية: روبوت، حساس فوق صوتي، خريطة ثلاثية الأبعاد، شبكة الإشغال، ROS, Octomap.

¹ مهندس في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

² مهندس في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

³ دكتور في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

Development of a low-cost ultrasonic environment detection system to build a 3D map of the environment around a robot

Eng. Majd Kassem

Eng. Saier Mahmoud

Dr. Louay Saleh

Abstract

Building a three-dimensional positioning map around a robot is still a difficult goal for researchers in the field of autonomous robots, due to the complexity of the mathematical issue first, the difficulty of technical implementation secondly, and the high cost of technical equipment third. When robotics overcomes this difficult goal and obtains a three-dimensional map of the environment with sufficient accuracy and acceptable range, a new horizon of research will open up providing the possibilities of positioning, finding the optimal path, and other capabilities of dealing with physical environment. Getting an accurate model of the unknown environment surrounding a robot depends on the type and quality of sensors used, which directly affects the cost and complexity of the robotic system.

In this research, an environment detection system was designed and implemented. This system is capable of detecting and modelling the unknown surrounding environment within a specific range. The system relied on several arrays of ultrasonic sensors, due to its low cost, the simplicity of its operational processes, and its ability to work in different climatic conditions. The array of sensors was installed on a platform that can rotate horizontally and vertically in order to give the measurement system the ability of environment scanning and covering the entire space in front of the robot. Based on the sensor array measurements, the system builds a map for the environment using the Occupancy Grid algorithm, which was achieved using the 3D library Octomap. In this paper, we have also developed an algorithm to represent the surrounding environment and take advantage of the rotational movement of the platform to give probabilistic values of space occupancy, this are reflected in the form of a color gradient on the map. The software part is implemented using C++ language libraries and within ROS operating system on Ubuntu, which makes it possible to be used later in most of the robotic platforms.

The results of applying the developed algorithm on real experiments showed its ability to model the surrounding environment using standard grid data structures that can be used later in subsequent robot tasks such as navigation and optimal path planning.

Keywords: Robot, ultrasonic sensors, 3D map, Occupancy Grid, ROS, Octomap.



الشكل (1) بنية عمليات الروبوت

تعتمد أغلب وظائف اتخاذ القرار على بناء خريطتين بشكل تراكمي:

- خريطة محلية Local Map تُعبّر عن المعلومات حول البيئة والناتجة من قياس واحد للحساسات المحيطية.

- خريطة عامة Global Map ناتجة عن تجميع الخرائط المحلية أو المشاهد المتلاحقة لكل قياس لتمثل فيما بعد البيئة المحيطة بالروبوت (Liu, et al., 2018, 26).

نجد الكثير من الأبحاث التي تسعى لبناء خرائط ثلاثية الأبعاد باستخدام حساسات متنوعة كالكاميرات وقوائيس المسافة الليزرية، كما تستخدم هذه الأبحاث العديد من خوارزميات الدمج لتصحيح عيوب الحساسات واستثمار ميزاتهما. من جهة أخرى نجد شحاً في الأبحاث التي تعتمد على الحساسات فوق الصوتية لبناء الخريطة ثلاثية الأبعاد للروبوت، ونذكر من الأعمال القليلة المميزة: قدم Basha, et al (2017) طريقة لرسم خريطة ثلاثية الأبعاد باستخدام حساس فوق صوتي وحيد مثبت على محركين يدور أحدهما في المستوي الأفقي والثاني في المستوي الشاقولي، بينما قام Raj, et al (2018) ببناء خريطة ثلاثية الأبعاد بالاعتماد على ثلاثة حساسات فوق صوتية مزاحة على المحور الشاقولي ومركبة على محرك يؤمن دوران حول المحور الشاقولي، في حين Nakajima, et al (2017) استفاد من الوزن الخفيف للحساس فوق

1 - المقدمة

شهدت الروبوتات منذ بدء الألفية الثالثة اهتماماً ملحوظاً في الأوساط الصناعية والأكاديمية، ولا تزال هذه التقنية في طور التطوير وبعيدة نوعاً ما عن الشكل النهائي المنشود. وبينما تركزت الجهود الأولى على النّبية الروبوتية والرياضيات المتعلقة بها من علاقات حركية وتحريكية وملاحية وتموضع، فإننا نشهد في عقدنا الحالي انتقالاً إلى استثمار نتائج المرحلة السابقة وتصميم عربات روبوتية تتمتع بالاستقلالية الذاتية بحيث تكون هذه العربات قادرة على استكشاف البيئة المحيطة من خلال مجموعة من الحساسات وإدراك هذه البيئة بمختلف تفاصيلها (العوائق، المسارات الممكنة، والكائنات).

تجري الأبحاث حالياً في كيفية إدارة العربة أو الروبوت لعملياته الذاتية مثل معرفة موضعه ضمن البيئة، وتخطيط المسار والتوجيه، وتجنب العوائق، واتخاذ قرار يخصص نشاط العربة الذاتي في البيئة المحيطة وهي بمجملها تُسمى عمليات اتخاذ القرار، الشكل (1). تبدأ هذه العمليات في المراحل الأولى بتحسس البيئة المحيطة ثم معالجة المعلومات، ثم دمج المعلومات الواردة من الحساسات المتعددة Data Fusion لتشكيل خريطة ثلاثية الأبعاد حول الروبوت وتوضع الروبوت على الخريطة، وبناءً على هذه الخريطة يُمكن إنجاز خوارزميات الذكاء الصناعي (Liu, et al., 2018,2).

نظراً لكلفتها المنخفضة جداً مقارنة ببقية أنظمة الكشف المعتمدة، حيث سيقوم البحث باستخدام عدد من هذه الحساسات وفق بنية مصفوفاتية قابلة للدوران في محاولة هدفها تحصيل أفضل كشف ممكن. وقد جرى التوجه إلى هذا الهدف وفق المراحل التالية:

- (1) تصميم مصفوفة كشف فوق صوتية يمكن استخدامها لتوليد غمامة نقطية ثلاثية الأبعاد.
- (2) استثمار الحركات الدورانية لمصفوفة الكشف وفق خوارزمية مسح نعطي بنتيجتها قيم إشغال احتمالية لشبكة الفراغ
- (3) تطوير خوارزمية تحسين لنتائج الكشف تقوم بتوقع انشغالية خلايا الفراغ بالاعتماد على القيم الاحتمالية.

3 مواد وطرق البحث

3.1 طرق تمثيل الخريطة:

تُعرّف الخَريطة على أنّها نموذج معلومات لعناصر البيئة الفعالة للروبوت. عملياً لا يمكن بناء خرائط دقيقة لبيئات الروبوت الواسعة في الزمن الحقيقي مع الاحتفاظ بالتفاصيل نظراً لكلفة المعالجة والتخزين الكبيرة، وإنما يتم بناء خرائط محلية في الجزء من البيئة الذي تكون معرفة تفاصيله مهمة للروبوت وهذا ما تحدده سرعة الروبوت نفسه. عموماً، يتم بناء خرائط الروبوت وفق تمثيلين أساسيين: التمثيل الطبولوجي والتمثيل المترى (Yi, et al., 2012). يقوم التمثيل الطبولوجي بتمذجة البيئة المحلية للروبوت على شكل مخططات هندسية من خلال استخدام النقاط أو العقد للدلالة على الأماكن، وهو يعتمد على استكشاف العلامات المميزة في البيئة (Johnson, 2018). أما التمثيل المترى (ويُعرف أيضاً بالتمثيل المعتمد على الإحداثيات Coordinate-Based) فيقوم بتمذجة البيئة

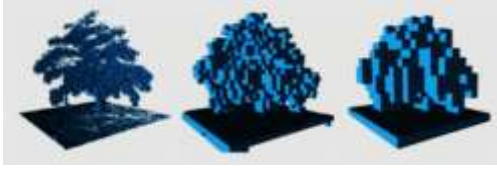
الصوتي وقام بتركيبه على جسم طائر مع تأمين محرك يدور هذا الحساس 360 درجة تغطي كامل المحيط. أُشتقت المقاربة المعتمدة للحل في هذا البحث من مقاربات المقالات السابقة، حيث قمنا بتنفيذ جهاز كشف فوق صوتي من خلال استخدام مجموعة من الحساسات موزعة بشكل دائري على طبقات كل طبقة مزاحة شاقولياً عن الطبقة الأخرى بمسافة يمكن تغييرها، كما يمكن تدوير هذه الطبقات حول المحور الشاقولي وحول المحور الأفقي. (الشكل 2).



الشكل (2) مصفوفة القياس فوق الصوتي

2 - هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى بناء نظام تحسس فوق صوتي قادر على كشف وتمذجة البيئة المحيطة بشكل ثلاثي الأبعاد. وقد تم اختيار الحساسات فوق الصوتية



الشكل (4) الرسم وفق دقة تمثيل مختلفة

3.3 حساسات الكشف المحيطي

تعتبر خريطة الإشغال الشبكية من أكثر أنماط تمثيل الخرائط المعتمدة في الروبوتات ويستخدم لبناء هذه الخريطة العديد من حساسات الكشف المحيطي، لكل منها ميزاته وعيوبه. يوضح الجدول (1) مقارنةً بين ميزات وعيوب حساسات الكشف المحيطي حسب إحدى عشر ميزة، مع تصنيف لجودة الحساسات ضمن أربعة قيم (0,1,2,3) تُعبّر القيم الأكبر - للمواصفات الستة الأولى- على أنّ الحساس المقصود يتمتع بهذه الميزات وجودة عالية، والعكس بالعكس، بينما تُعبّر القيم الأصغر - للمواصفات الخمسة المتبقية- على أنّ الحساس يتمتع بهذه الميزات وجودة عالية، والعكس بالعكس.

الجدول (1) مقارنةً بين أداء الحساسات المستخدمة في

الروبوتات

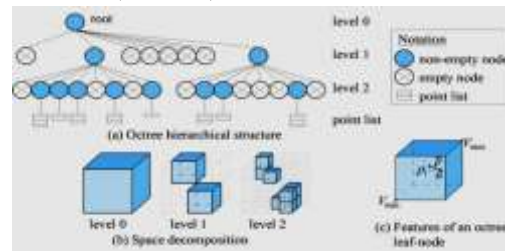
Camera	3D LiDAR		Radar	Ultrasonic	Feature		
	ToF	IR				VIS	Solid State
2	3	3	2	3	2	1	FOV
2	3	2	3	3	3	1	Range
2	2	3	3	3	2	1	Accuracy
3	3	2	2	2	2	2	Frame Rate
1	1	3	2	2	1	1	Resolution
1	1	3	2	1	0	0	Colour Perception
1	1	1	1	2	1	1	Size
3	1	3	2	2	1	1	Weather affections
2	2	2	1	2	1	2	Maintenance
2	2	2	2	3	1	2	Visibility
2	3	1	1	3	2	1	Price

نجد وحسب الجدول (1) أنّه بالنسبة للمواصفات الستة الأولى تحقق حساسات LiDAR والكاميرات الليلية IR أفضل أداءً مقارنةً ببقية الحساسات، لكنّها على العكس من ذلك بالنسبة للمواصفات الخمسة الأخيرة حيث نجد أنّ الحساسات فوق الصوتية تتمتع

المحيطة بالروبوت عن طريق تحديد العلاقات بين العلامات المميزة للبيئة عن طريق نظام إحداثيات مُطلق (Tomatis, 2007) وهناك العديد من البنى المطورة لهذا التمثيل أشهرها Octomap.

3.2 مكتبة Octomap

تُعرّف Octomap على أنّها مكتبة تحقق تمثيلاً ثلاثي الأبعاد للبيئة المحيطة بالروبوت وفق شبكة إشغال ثلاثية الأبعاد 3D Occupancy Grid والتي تعمل على تحقيق تمثيل حجمي Volumetric Representation للوسط المحيط بالروبوت. يعتمد بناء شبكة الإشغال ثلاثية الأبعاد في Octomap على خوارزمية Octree وهي عبارة عن بنية معطيات شجرية Tree Data Structure يكون فيها لكل عقدة داخلية ضمن الشجرة ثمانية أولاد (الشكل 3).



الشكل (3) بنية المعطيات الشجرية Octree

تمثّل كل عقدة في الشجرة الحجم الموجود في مكعب Voxel في الوسط المحيط، ينقسم هذا المكعب بشكل متكرر إلى ثمانية حجوم فرعية، وهكذا حتى يتم الوصول إلى المكعب ذو الحجم الأصغري والذي يوافق الدقة المطلوبة للتمثيل وعدد مستويات التقسيم. وبما أنّ البنية شجرية فيمكن الحصول على خرائط ذات دقات تمثيل مختلفة متعلقة بعمق مستوى التقسيم (أكثر خشونة أو أكثر نعومة) (Hornung, et al., 2013). يوضح الشكل (4) ثلاث خرائط بدقات تمثيل مختلفة لنفس الجسم (الشجرة).

ومعالجتها وإرسالها إلى وحدة التحكم التي تعمل على توليد نبضة ذات عرض مُتناسب مع بُعد الجسم عن الحساس، وتُعبّر عن الفترة الزمنية Duration ما بين إرسال الأمواج فوق الصوتية واستقبالها، تُعرف هذه الفترة بزمن الرحلة (ToF (Marioli, et al., 1992). يتم حساب المسافة وفق العلاقة (1):

$$d = \left(\frac{\text{ToF}}{2} \right) \times v_s, v_s \approx (331.4 + 0.6T_c) \text{ms}^{-1}$$

$$v_s = 0.0343 \text{ cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}; \text{ at } T_c = 20^\circ \text{C} \quad 1$$

$$\Rightarrow d_{\text{cm}} = \frac{\text{ToF}_{\mu\text{s}}}{58}$$

أحد أكثر أنواع الحساسات فوق الصوتية انتشاراً في التطبيقات العملية هو الحساس HC-SR04، الذي يتميز بصغر حجمه واستهلاكه المنخفض للطاقة، وبمجال كشف يصل حتى أربعة أمتار وبدقة 1% إلى 3% من المسافة المُقاسة. يبيّن الشكل (5) بُنية الحساس HC-SR04 (Technologies, 2013). يعمل هذا الحساس بجهد مُستمر يساوي 5 فولط، وله طرف دخل Trig وطرف خرج Echo.

من الجدير بالذكر أن إجراء قياس بهذا الحساس عند المسافة الأعظمية يحتاج إلى زمن يمكن حسابه بالعلاقة (2):

$$\text{ToF}_{\mu\text{s}} = d_{\text{max}} \times 58 = 23.2 \text{ m s} \quad 2$$

وهو عامل مهم يؤثر على معدل تحديث الخريطة.

بحجوم وأوزان صغيرة مُقارَنةً ببقية الحساسات، ولا تتأثر بالعوامل الجوية والإضاءة بعكس الكاميرات النهارية التي لا يُمكنها العمل في البيئات المظلمة وحساسات LiDAR التي تؤثر ألوان الأجسام على سلوكها، إضافةً إلى تكلفة الحساس فوق الصوتي المنخفضة وسهولة تشغيله مما سيجعله أحد أدوات بحثنا الأساسية.

3.4 الطريقة المقترحة لبناء الخريطة

تم في هذا البحث رسم خريطة ثلاثية الأبعاد بالاعتماد على مجموعة من الحساسات فوق الصوتية من نوع HC-SR04 (الذي يملك زاوية رؤيا FoV تساوي 30 درجة). ولأجل هذه الغاية قمنا بتصميم وتنفيذ كتلة قياس تحتوي عدد من الحساسات فوق الصوتية موزعة بشكل دائري على طبقات أسميائها كتلة الكشف فوق الصوتي، مع تزويدها بإمكانية الدوران في المستويين الأفقي والشافولي. تقيس هذه الكتلة مسافات الأجسام وزوايا توضعها العمودية والأفقية وترسلها إلى نظام التشغيل ROS الذي يحتوى على مكتبة Octomap المجهزة لاستقبال تلك القياسات ومعالجتها لبناء شبكة إشغال ثلاثية الأبعاد -تشكل الخريطة- بشكل موافق لبيئة القياس الحقيقية. يمكن تلخيص مراحل الحل بالخطوات التالية:

- 1) اختيار الحساس فوق الصوتي
- 2) تصميم وتنفيذ كتلة الكشف فوق الصوتي
- 3) تطوير برمجيات التمثيل ثلاثي الأبعاد وسنقوم فيما يلي بشرح هذه الخطوات.

1.3.4 اختيار الحساس فوق الصوتي

تقع الأمواج فوق الصوتية خارج المجال الترددي الذي يُمكن لأذن الإنسان سماعه، أي فوق 20 كيلو هرتز. يعتمد مبدأ القياس بالحساس فوق الصوتي على إرسال إشارة فوق صوتية ثم النقاط الأمواج المنعكسة

خلال الدوران الذي يؤثر على معدل تحديث الخريطة، والذي يرتبط أيضاً بمجموع الضياعات الزمنية في النظام التي يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

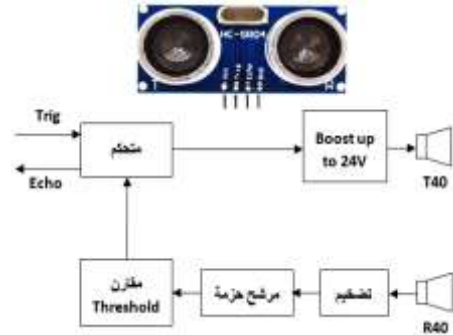
$$delay_t = delay_m + delay_s \times n_s$$

يُعبّر $delay_t$ عن الزمن اللازم لإجراء قياس واحد، و $delay_m$ هو التأخير الزمني الذي تتطلبه خطوة المحرك، و $n_s * delay_s$ هو التأخير الذي يتطلبه n حساس، وقد قمنا باهمال الأزمان المتعلقة بالمعالجة والإرسال.

يتم التحكم بهذه الكتلة عن طريق بطاقة إلكترونية تحتوي متحكم صغري Atxmega256 وتتضمن برمجيات مطورة لتقوم بالوظائف التالية:

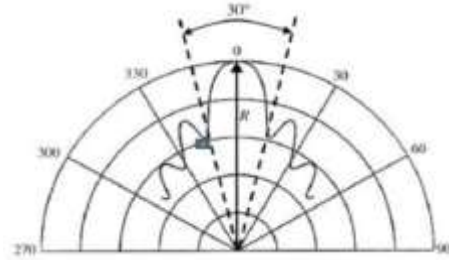
- قذح الحساسات فوق الصوتية بشكل متتابع حيث يتم تفعيل الحساس ثم تسجيل قياسه والزوايا التي حدث عندها القياس وتكرر هذه العملية حسب عدد الحساسات العاملة.
- تجميع القياسات (المسافات والزوايا) لجميع الحساسات ضمن إطار بيانات يرسل وفق بروتوكول إرسال RS232 إلى الحاسب.
- تدوير المحركات أفقياً وشاقولياً بعد كل قياس تبعاً لخوارزمية المسح المعتمدة.

يتم التخاطب مع بطاقة التحكم بكتلة الكشف عن طريق واجهة برمجية مبنية باستخدام لغة C# هدفها ضبط إعدادات القياس المختلفة وأتمتة عمليات القياس من أجل إجراء سيناريوهات اختبار وتقييم مختلفة، حيث تمكنا هذه الواجهة البرمجية من التحكم في عدد الحساسات الفعالة، وزاوية الدوران الأفقية والشاقولية وغير ذلك من الإعدادات الخاصة بالحساس فوق



الشكل (5) المخطط الصندوقي للحساس HC-SR04

يبين الشكل (6) المواصفات الفنية للحساس المعتمد حيث تظهر زاوية الكشف الفعالة مقاسة بالنسبة للمحور المار من منتصف المسافة بين المرسل والمستقبل.



الشكل (6) مواصفات الحساس فوق الصوتي وفق النشرة الفنية

2.3.4 تصميم وتنفيذ كتلة الكشف فوق الصوتي

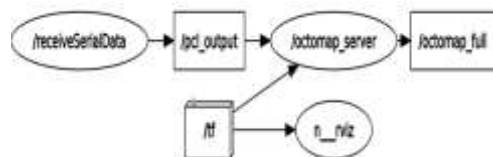
تتألف هذه الكتلة من محركين - الشكل (2) - يعملان على تدوير ثلاث طبقات دائرية في المستويين (x, y) والمستوي (z) تتباعد عن بعضها بفواصل مسافة قابلة للتغيير. تدعم هذه الكتلة استخدام حتى 12 حساس فوق صوتي يُمكن توزيعها على ثلاث طبقات كحد أقصى. تم اختيار نصف قطر الطبقة الدائرية بما يتناسب مع خواص المحركات المستخدمة وأبعاد الحساس المستخدم، حيث أن الطبقة الواحدة تتسع لثمانية حساسات - أي بفواصل زاوي مقدارها 45 درجة - تغطي كامل الدائرة حول الروبوت مع وجود منطقة عمياء بين كل حساسين متتاليين يمكن تغطيتها من

- يمكن استثمار الكتلة بدون محركات مما يجعلها خفيفة الوزن وهذا ما يجعلها قابلة للتركيب على بعض أنواع الدرونات.
- يمكن استثمارها لكشف كامل المحيط (360 درجة).
- يمكن التحكم بعدد الحساسات وزاوية الدوران المطلوبة تبعاً لمعدل تحديث الخريطة المطلوب وحجم القطاع الزاوي من الفراغ المطلوب تغطيته.

3.3.4 تطوير برمجيات التمثيل ثلاثي الأبعاد

من أجل استثمار قياسات كتلة الكشف فوق الصوتي في تمثيل الخريطة كان لا بد من تزويد النظام ROS بمجموعة من العقد البرمجية:

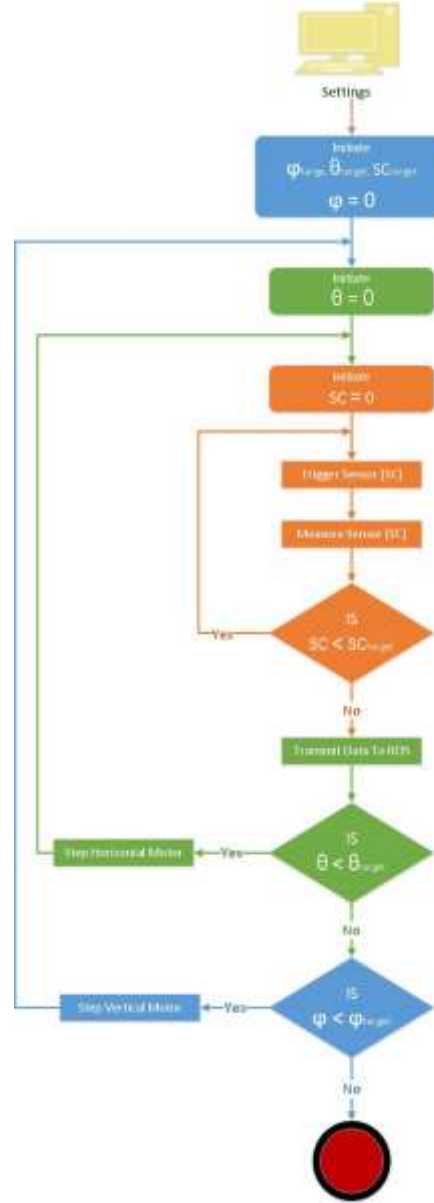
- عقدة استقبال (/receiveSerialData): تستقبل القياسات من كتلة الكشف فوق الصوتي وتحولها من التمثيل بالإحداثيات الأسطوانية (r, θ, φ) إلى التمثيل بالإحداثيات الديكارتيّة (x, y, z) ويثها على شكل رسالة أو topic (/pcl_output)
 - عقدة Octomap (/octomap_server): تقوم هذه العقدة باستقبال رسالة العقدة الاستقبال وتشكيل شبكة إشغال ثلاثية الأبعاد في الزمن الحقيقي وبنها على شكل رسالة أو topic (/octomap_full).
 - عقدة الرسم (n_rviz): تستخدم هذه العقدة برنامج العرض Rviz المضمن ضمن ROS لعرض نموذج الخريطة الذي قامت Octomap ببنائه.
- يوضح الشكل (8) خوارزمية التمثيل ثلاثي الأبعاد المنفذة ضمن نظام التشغيل ROS.



الشكل (8) خوارزمية العمل في نظام ROS

بينما يوضح الشكل (9) المخطط العام للنظام.

الصوتي نفسه. يوضح الشكل (7) خوارزمية القياس المبنية ضمن معالج البطاقة.



الشكل (7) المخطط التدفقي لخوارزمية عمل البطاقة الإلكترونية

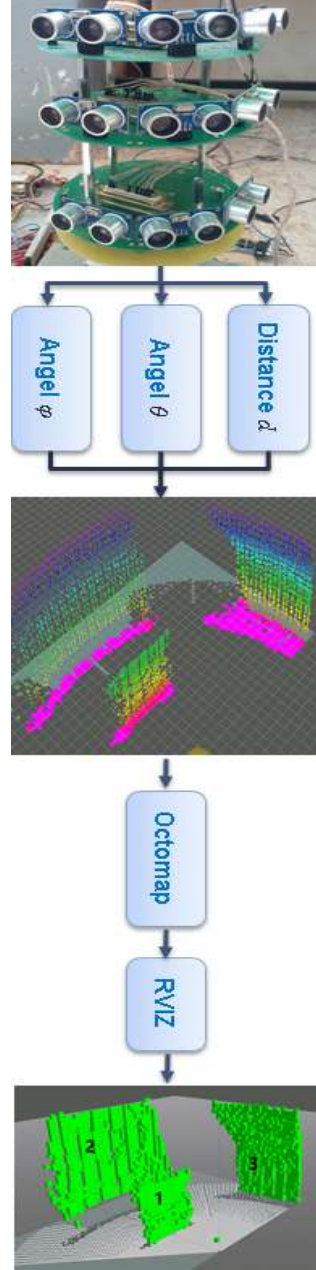
يمكن تلخيص مميزات كتلة الكشف فوق الصوتي

بما يلي:

عدد وتوزع الأجسام ضمنها. وكشروط عامة لجميع التجارب فقد فرضنا أن تتوضع الأجسام بطريقة تضمن حدوث انعكاس كافي للموجة فوق الصوتية. ولا بدّ من الإشارة في سياق إجراء هذه التجارب إلى أنّ الخرائط المولدة في كل تجربة تحقق معيارية Octomap، بمعنى آخر إن Octomap تقسم فراغ التجربة إلى عدة مستويات هرمية يبلغ عددها الأعظمي 16 مستوى، أي يمكن إجراء قطع للشجرة عند أي مستوى وعليه سوف نجد في التجارب اللاحقة استعلامات للخريطة عند مستويات تمثيل مختلفة. تفيد هذه الميزة حقيقةً في الحصول على نماذج بيانات بتفاصيل خشنة أو ناعمة.

التجربة الأولى: كشف جسمين بارتفاعين مختلفين

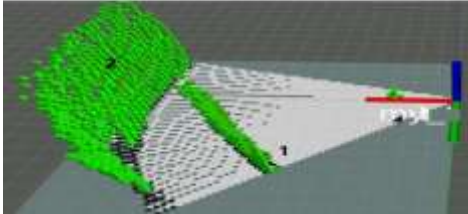
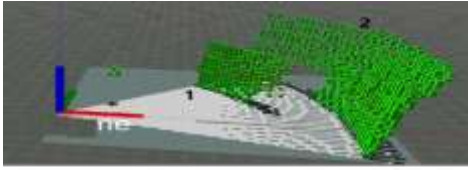
نهدف في هذه التجربة إلى تقدير نموذج ثلاثي الأبعاد لجسمين لهما ارتفاعين مختلفين ويتوضعان على مسافتين مختلفتين من كتلة الكشف فوق الصوتي. نستخدم لهذه الغاية ثلاث طبقات ونستخدم في كل طبقة حساس واحد فقط. نزود كتلة الكشف فوق الصوتي بزاوية دوران مقدارها 45° في المستوي (x, y) ، و 20 درجة في المستوي (z) وبمجال قياس أعظمي مقداره 1 م. يوضح الشكل (10) جزء بيئة العمل للتجربة الأولى قيد التنفيذ، أما الشكل (11) فيوضح نتيجة استعلامنا عن الخريطة المولدة عند المستوى الأعظمي 16، والشكل (12) عند المستوى 15 أما الشكل (13) فيمثل استعلام الخريطة المقدرة لبيئة التجربة الأولى عند المستوى 14 مع وجود خريطة ألوان وبدقة 1 سم.



الشكل (9) المخطط العام للنظام

4 النتائج ومناقشتها

في إطار تقييم سلوك كتلة الكشف فوق الصوتي، وتقييم الخريطة الناتجة تم إجراء مجموعة من التجارب لنمذجة مجموعة من البيئات ضمن شروط تشغيل مختلفة، تختلف هذه البيئات عن بعضها البعض في



الشكل (11) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجريبية الأولى (المستوى 16)

الشكل (10) بيئة العمل المختبرة للتجربة الأولى

يظهر في الجزء العلوي من الشكل (10) المنظور الأمامي للجسمين بالنسبة لكتلة الكشف فوق الصوتي، أما الجزء السفلي فيبين المنظور العلوي لبيئة العمل حيث يتضح وجود كائنين منفصلين يتوضعان مقابل كتلة الكشف فوق الصوتي بحيث يتقاطع الجسم رقم 1 مع الجسم رقم 2 بمساحة تساوي مساحة الجسم رقم 1. يوضح الجزء العلوي من الشكل (11) تمثيل Octomap لبيئة العمل الموضحة بالشكل (10)، حيث يظهر أن الجسم رقم 1 يحجب عن كتلة الكشف فوق الصوتي جزءاً من الجسم رقم 2، ومساحة هذا الجزء تساوي مساحة الجسم رقم 1، حيث تساهم الطبقة الثالثة في تعيين الحدود التي يكون عندها الجسم رقم 2 منظوراً بالنسبة لكتلة الكشف فوق الصوتي، أما الجزء السفلي من الشكل (11) فيوضح المسافة الفاصلة بين الجسمين من منظور علوي.

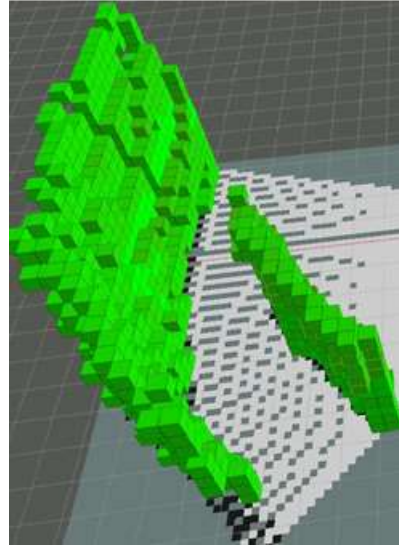
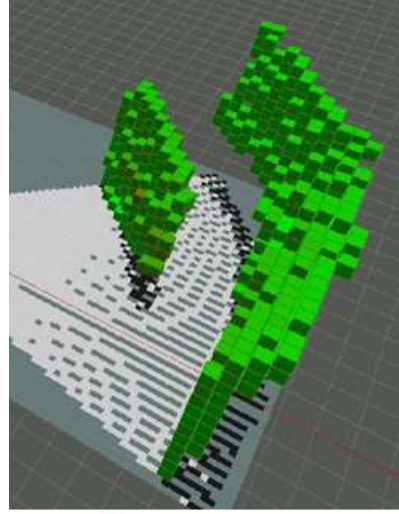
يوضح الشكل (12) تمثيلاً مكافئاً للتمثيل الموضح في الشكل (10)، لكن جرى الاستعلام عن الخريطة هنا عند المستوى 15 وظهرت الخريطة أكثر خشونة مقارنةً بالشكل (11).

يؤمن دوران الكتلة في المستوي x, y معلومات عن عرض الجسمين، أما الدوران في المستوي z يؤمن معلومات عن ارتفاع الأجسام، حيث نجد وفق الجدول 2 أنّ تقدير عرض الأجسام يكون أفضل من تقدير ارتفاعها، وأنه من أجل الأجسام القريبة -التي تتوضع عند المسافات الأصغر من 50 سم- يكون تقدير العرض -بخطأ 12 % - أفضل مما هو عليه بالنسبة للأجسام الأبعد -بخطأ 14 % - وهو عائد لطبيعة انتشار الأمواج فوق الصوتية. نفس النتيجة يمكن ملاحظتها من المعلومات حول الارتفاع، حيث أنه من أجل الأجسام الأقرب نحصل على خطأ تقدير يساوي 25 % وبقيم أسوأ بالنسبة للأجسام الأبعد والذي يساوي 28 %، أما فيما يخص بُعد الأجسام فإننا نلاحظ أنّ القيم جيدة وهي تقع ضمن خطأ القياس المعروف في النشرة الفنية للحساس فوق الصوتي.

نظراً لاستخدامنا ثلاثة حساسات، يمكن بسهولة تحديد زمن تحديث الخريطة الأمثل وفق العلاقة (2) لنجد أنه يساوي $69.6 ms$ وأنه يلزم لإجراء مسح مستوي (x, y) وحيد زمنياً أمثلياً يمكن حسابه من العلاقة التي تستخدم $Delay_m$ المعبر عن التأخير الزمني اللازم التقيد به لإجراء خطوة وحيدة مقدارها 1.8 درجة للمحرك وهو يساوي في حالتنا $10 ms$ ، ونظراً لأننا ننجز دوراناً في المستوي (x, y) مقداره 45° والذي يتطلب $25 = \frac{45}{1.8}$ دورة من المحرك، فهذا يعني أنّ كلفة مسح مستوي (x, y) وحيد يساوي:

$$T_{scan(x,y)} = 10 \times 25 + 11 \times 69.6 = 319.6 ms$$

ويتطلب دوراناً في المستوي Z بمقدار $11 = \frac{20}{1.8}$ دورة، وبالتالي تصبح كلفة كامل القطاع المحدد بزوايا الدوران تساوي:

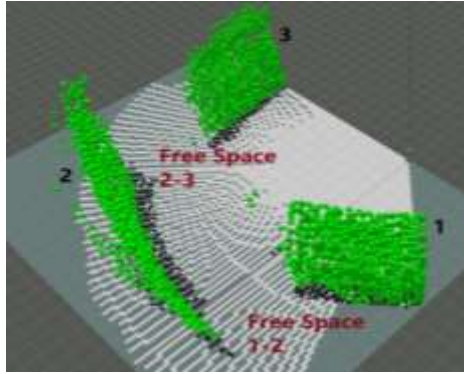


الشكل (12) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجربة الأولى (المستوى 15)

يقدم الجدول (2) مقارنة بين قيم أبعاد الأجسام، ارتفاعها وعرضها كما تقدمها خريطة Octomap وبين القيم الحقيقية المقاسة يدوياً.

الجدول (2) مقارنة بين أبعاد الأجسام مع أبعادها وفق Octomap لبيئة عمل التجربة الأولى

الأجسام	العرض (cm)		الارتفاع (cm)		البعد (cm)	
	الخطأ	المقاس الحقيقي	الخطأ	المقاس الحقيقي	الخطأ	المقاس الحقيقي
الجسم 1	12%	45	25%	50	2.2%	35.8
الجسم 2	14%	80	28%	85	1.3%	76



الشكل (15) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجربة الثانية (منظور علوي)

الجدول (3) مقارنة بين أبعاد الأجسام مع أبعادها وفق

Octomap لبيئة عمل التجربة الثانية

الأجسام	العرض (cm)		الارتفاع (cm)			البعد (cm)	
	المقاس	الخطأ	المقاس	الخطأ	المقاس	الخطأ	
الجسم 1	42	15%	66	18%	51	2%	
الجسم 2	50	28%	70	21%	76	1%	
الجسم 3	55	41%	61	8%	85	0	

يتضح من الجدول 3 أن كتلة الكشف فوق

الصوتي تعطي تقديراً جيداً لأبعاد الأجسام، بينما نلاحظ بالنسبة لتقدير قيم عرض الأجسام قياسات مقبولة للأجسام القريبة وبخطأ 15% بينما يصل خطأ تقدير العرض من أجل الأجسام الأبعد إلى 41% .

الجدول (4) مقارنة أبعاد المناطق الفارغة مع أبعادها وفق Octomap لبيئة عمل التجربة الثانية

الفراغ	الأبعاد (cm)		
	المقاس	الخطأ	الخطأ
الجسم 1 مع 2	48	34	29.1%
الجسم 2 مع 3	61	43	29.5%

أما بالنسبة لتقدير قيم ارتفاع الأجسام فتعطي كتلة الكشف قياسات مقبولة للأجسام القريبة وبخطأ مقداره 17%، في حين نلاحظ بالنسبة للأجسام الأبعد أن تقدير الارتفاع يعطي نتائج أفضل وبشكل معاكس لتقدير قيم العرض، إن السبب في ذلك هو زاوية توضع الأجسام بالنسبة لكتلة الكشف فوق الصوتي

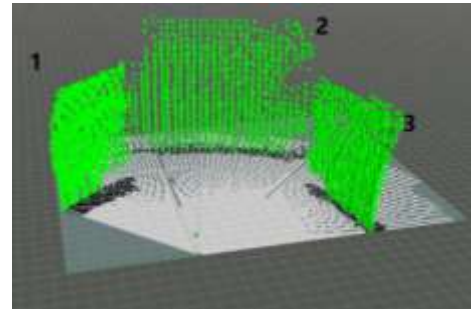
$$T_{scan(all)} = (T_{scan(x,y)} + 10) \times 11 = 3.6 s$$

التجربة الثانية: كشف ثلاثة أجسام بارتفاعات مختلفة نهدف في هذه التجربة إلى تقدير نموذج لمناطق الفراغ المتوضعة بين ثلاثة كائنات، ونستخدم لهذه الغاية 3 طبقات بثلاثة حساسات في كل طبقة وبدوران مقداره 45° في المستوي (x, y) و 20 درجة في المستوي (z). يوضح الشكل (13) بيئة العمل للتجربة الثانية، أما الشكل (14) فيوضح تمثيل Octomap لهذه البيئة من منظور أمامي، والشكل (15) يوضح تمثيل Octomap من منظور علوي.



الشكل (13) بيئة العمل المختبرة للتجربة الثانية

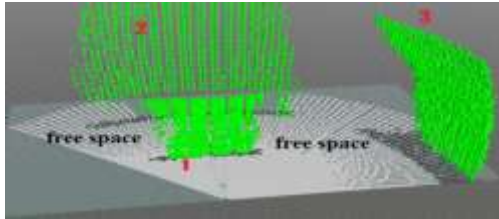
يظهر من الشكل (14) توزع الأجسام في بيئة العمل ووجود المنطقة الفارغة بين الجسم رقم 1 والجسم رقم 2 (Free Space 1-2) والمنطقة الفارغة بين الجسم رقم 2 والجسم رقم 3 (Free Space 2-3).



الشكل (14) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجربة الثانية (منظور أمامي باتجاه القياس 16)



الشكل (17) تمثيل بيئة العمل المختبرة للتجربة الثالثة
 نهدف في هذا الاختبار إلى تقدير نموذج للفراغ
 المتكون بين جسمين بارتفاعين مختلفين من جهة وبين
 جسم وحيد ثالث من جهة أخرى، ونستخدم لهذه الغاية
 3 طبقات بثلاثة حساسات في كل طبقة وبدوران مقداره
 45 درجة في المستوي (x, y) و 20 درجة في
 المستوي (z) ، يوضح الشكل (18) تمثيل Octomap
 لهذه البيئة من منظور أمامي حيث يظهر من الشكل
 كيف يحجب الجسم رقم 1 جزءاً من الجسم رقم 2
 والذي يساهم في تشكيله الطبقة الثالثة ثم بعد عدة
 دورانات في المستوي (z) تساهم الطبقة الثانية في
 تشكيله، يظهر أيضاً من الشكل امتداد الجسم رقم 2 عن
 الجسم رقم 1 يمينا ويساراً بشكل مكافئ للشكل (17).



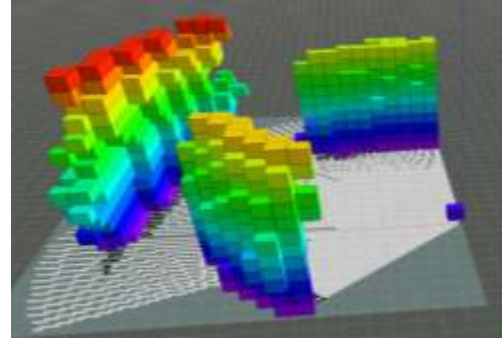
الشكل (18) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجربة
 الثالثة (منظور أمامي باتجاه القياس)

يوضح الشكل (19) منظوراً آخر للبيئة الممثلة
 وفق Octomap حيث تظهر المسافة الفارغة إلى يمين
 الجسم رقم 2 بالإضافة إلى المنطقة الفارغة بين الجسم
 رقم 1 والجسم رقم 2.

حيث نلاحظ من الشكل 12 أن الجسم رقم 3 يتوضع
 بشكل متعامد مع كتلة الكشف فوق الصوتي.

بالنظر إلى الجدول 4 نلاحظ أن الفراغات بين
 الأجسام تبدو أصغر مما هي عليه في الواقع العملي،
 حيث تتأثر القياسات بزوايا توضع الأجسام بالنسبة
 لكتلة الكشف فوق الصوتي.

أيضاً يمكن الحصول على خريطة ألوان وبدقة
 تمثيل 4 سم - الشكل (16) - حيث تُعبّر الألوان
 المتماثلة عن الخلايا التي لها نفس قيم الارتفاع (z)
 علماً أنه يمكن تحديد لون محدد من أجل ارتفاع محدد



الشكل (16) تمثيل Octomap لبيئة عمل التجربة
 الثالثة (عند المستوى 14 لخريطة ألون)

التجربة الثالثة: كشف ثلاثة أجسام بارتفاعات
 مختلفة وبتوضعات مختلفة

تشبه شروط هذه التجربة شروط التجربة الأولى،
 الفرق هنا هو وجود جسم ثالث يصنع منطقة فارغة مع
 الجسم الثاني وفق الشكل (17) الذي يوضح امتداد
 الجسم رقم 2 عن الجسم رقم 1 في كلا الجانبين،
 إضافة لوجود جسم رقم 3 إلى يمين كتلة الكشف فوق
 الصوتي ويصنع منطقة فارغة مع الجسم رقم 2.

الجدول (5) مقارنة بين أبعاد الأجسام مع أبعادها وفق

ليبيئة عمل التجزئة الثالثة

الأجسام	العرض (cm)		الارتفاع (cm)		البعد (cm)	
	الخطأ	المقاس	الخطأ	المقاس	الخطأ	المقاس
الجسم 1	10%	42	39	10%	35	36
الجسم 2	20%	90	75	9%	66	74
الجسم 3	28%	50	39	14%	64	77

الجدول (6) مقارنة بين أبعاد المناطق الفارغة مع

أبعادها وفق Octomap ليبيئة عمل التجزئة الثالثة

الفراغ	الأبعاد (cm)		
	الخطأ	المقاس	الخطأ
انزياح الجسم 2 عن 1 يساراً	25%	15	20
انزياح الجسم 2 عن 1 يميناً	26.6	22	30

الجدول (7) مقارنة بين عدد خلايا شبكة الإشغال

المولدة وبين عدد الخلايا الفعلي ليبيئة التجزئة الثالثة

الأجسام	العرض (خلية)			البعد (خلية)		
	الخطأ	المقاس	الخطأ	الخطأ	المقاس	الخطأ
الجسم 1	0%	8	39/5=8	0%	7	35/7=5
الجسم 2	13%	17	75/5=15	0%	15	75/5=15
الجسم 3	38%	11	39/5=8	6%	14	75/5=15

يُمكن القول وفقاً للمعلومات التي يُقدّمها الجدول

(5) أنّ تقدير معلومات عرض و ارتفاع الأجسام

القريبة من كتلة الكشف فوق الصوتي يكون أفضل من

الأجسام الأبعد وبخطأ مقداره 10 %، إضافة إلى تأثير

زاوية توضع الأجسام على دقة التقدير حيث يظهر في

الجدول أنّ تقدير معلومات الارتفاع يكون أفضل

بالنسبة للأجسام الأبعد بالمقارنة مع تقدير معلومات

العرض حيث نحصل على خطأ تقدير 9 % بالنسبة

للجسم رقم 2 الذي يتوضع بشكل متعامد من كتلة

الكشف، أيضاً بملاحظة الجدول (6) نجد أيضاً خطأ

في تقدير قيم انزياح الجسم رقم 2 عن الجسم رقم 1

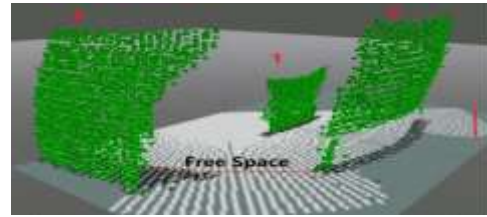
والسبب في ذلك هو الانعكاسات المختلفة للموجات

فوق الصوتية عند أطراف السطح، يُمكن أيضاً

مقارنة النتائج وفق منظور الروبوت لخلايا الخريطة

الشبكية ثنائية البعد، حيث يُقدّم الجدول (7) مقارنة بين

تقسيمنا الفعلي ليبيئة العمل وبين تقسيمات الخريطة



الشكل (19) تمثيل Octomap آخر ليبيئة عمل

التجزئة الثالثة، تظهر المناطق الفارغة بين الأجسام

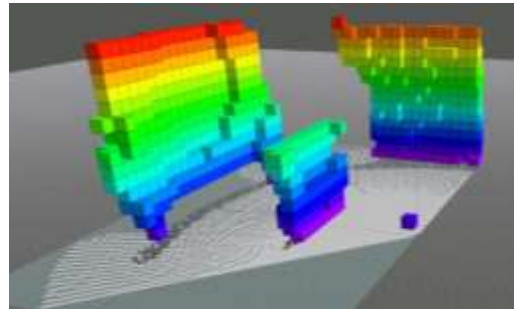
يوضح الشكل (20) خريطة الألوان الموافق ليبيئة

عمل التجزئة الثالثة حيث يظهر أنّ كلاً من الجسم رقم

2 والجسم رقم 3 لهما نفس قيم الارتفاع - اللون

الأحمر - بينما يظهر الجسم رقم 1 بارتفاع مختلف

عنهما.



الشكل (20) تمثيل Octomap ليبيئة عمل التجزئة

الثالثة (خريطة ألوان)

بينما يوضح الشكل (21) الخريطة ثنائية البعد

المعبّرة عن شبكة الإشغال ثنائية البعد ليبيئة عمل

التجزئة. إن جميع الخلايا السوداء تعتبر مناطق

مشغولة بدرجة يقين عالية (القيمة 1)، أما الخلايا

البيضاء فتتمثل مناطق فارغة وبدرجة يقين عالية أيضاً

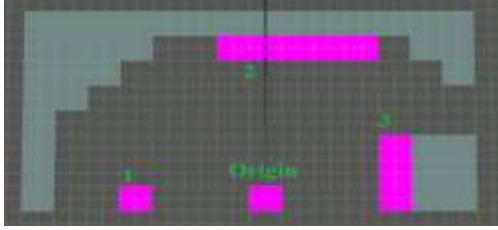
(القيمة 0).



الشكل (21) تمثيل Octomap ليبيئة عمل التجزئة الثالثة

(خريطة 2D خريطة الاحتمالية العظمى)

يظهر الشكل (23) تمثيل الخريطة ثنائية البعد لبيئة العمل في الشكل (22)



الشكل (23) خريطة شبكة الإشغال ثنائية البعد لبيئة

عمل التجربة الرابعة من أجل دقة تمثيل 10 سم

يوضح الجدول (8) مقارنةً بين عدد خلايا شبكة الإشغال للخريطة ثنائية البعد المولدة مع العدد الفعلي لخلايا بيئة العمل الموضحة في الشكل (22) وعند دقة تمثيل 10 سم، تظهر قيمة خطأ تقدير العرض للجسم رقم 3 كبيرة وذلك نتيجة لتوضع الجسم رقم 3 بشكل غير عمودي مع كتلة الكشف فوق الصوتي، أما بالنسبة للجسم رقم 2 يظهر تقدير خطأ العرض كبيراً بالمقارنة مع الجسم 1 الذي يتوضع بشكل عمودي وعلى مسافة أقرب من توضع الجسم 2

الجدول (8) مقارنةً بين عدد خلايا شبكة الإشغال المولدة

وبين عدد الخلايا الفعلي لبيئة التجربة الرابعة

الأجسام	العرض (خلية)			البعد (خلية)		
	الخطأ	المقاس	الخطأ	المقاس	الخطأ	المقاس
الجسم 1	0%	2	0%	7	7	70/10=7
الجسم 2	11%	10	0%	12	12	120/10=12
الجسم 3	0%	6	0%	7	7	74/10=7

خلاصة التجارب

من التجارب السابقة يتبين أن نموذج الخريطة لكل تجربة يعطي معلومات عن بعد الأجسام بخطأ لا يتجاوز 3% من مجال القياس أما بالنسبة لمعلومات عرض وارتفاع الأجسام تبين أنه من أجل الأجسام القريبة من كتلة الكشف فوق الصوتي فإن خطأ تقدير العرض يبلغ 10.2% في أفضل الأحوال، أما بالنسبة لخطأ تقدير الارتفاع فإنه يبلغ 8% في أحسن الأحوال،

الشبكية من أجل دقة تمثيل 5 سم حيث يظهر تقدير عدد الخلايا المشغولة وفق منظور الروبوت أفضل من القيم المقاسة بالسنتيمتر، وهذا منطقي نظراً للتقريب الحاصل عند إسقاط نقطة مقياس من البيئة إلى خلية من خلايا الشبكة.

التجربة الرابعة: منظور الروبوت للبيئة المحيطة

قدمت التجارب السابقة مقارنات بين قيم الأبعاد الحقيقية التي تشغلها الأجسام وأبعاد المناطق الفارغة المتشكلة بين تلك الأجسام من جهة، وبين القيم التي تقدمها الخريطة من جهة أخرى، وتم إجراء المقارنات وفقاً للأبعاد بالسنتيمتر، وكون أننا نعتمد التمثيل الشبكي لتقدير نموذج بيئة العمل فإن ما يهم الروبوت حقيقةً هو الخريطة الشبكية والتي يتم بناؤها عن طريق تقريب كل نقطة قياس (x, y, z) مقياساً بالسنتيمتر إلى خلية عنونة (x, y, z) ، وعليه سنقوم في هذه التجربة بمقارنة عدد الخلايا التي تشغلها الأجسام ضمن بيئة التجربة مع عدد الخلايا التي قامت Octomap بنمذجتها مع تبيان تأثير زاوية توضع الأجسام على دقة التمثيل.



الشكل (22) توزع الأجسام في بيئة العمل المختبرة للتجربة الرابعة

يوضح الشكل (22) وجود ثلاثة أجسام في بيئة العمل بمواضع مختلفة، حيث يمكن بسهولة استنتاج عدد الخلايا التي يشغلها كل جسم إضافة إلى بعد كل جسم مقياساً بالخلية عن طريق تقسيم عرض الجسم أو بعده على دقة التمثيل والذي اخترناه 10 سم لسهولة المقارنة.

بلغت 10.2% لكل من عرض وارتفاع الأجسام، وبلغت 17.8% و 15% لكل من عرض و ارتفاع الأجسام التي تتوضع على بعد 50 سم، وبلغت 9% و20% للأجسام التي تتوضع على بعد 75 سم.

يُمكن مُقارَنَة النتائج التي حصلنا عليها عند تقديرنا لعرض الأجسام مع (Fazal Noor, 2018)، حيث استخدم المؤلف حساس فوق صوتي وحيد مُقاد بمحرك خطوي من خلال بطاقة أردوينو لتقدير عرض جسمين بعرض 8.5 سم للجسم الأول و 17 سم بالنسبة للجسم الثاني، حيث أجرى المؤلف تجربتين، في الأولى يتوضع الجسمين على مسافة 15 سم من الحساس أما في الثانية يتوضع الجسمان على مسافة 30 سم، يوضّح الشكل (25) مُقارَنَة بين القيم التقديرية التي حصلنا عليها وبين القيم التي حصل عليه المؤلف.



الشكل (25) مُقارَنَة بين النتائج التي حصلنا عليها ونتائج أعمال مماثلة في تقدير عرض الأجسام

يوضّح الجزء اليساري في الشكل (25) النتائج التي حصل عليها (Fazal Noor, 2018) حيث حصل على خطأ 11.7% في تقدير عرض جسم يتوضع على مسافة 15 سم من الحساس، وحصل على خطأ 17.6% لنفس الجسم على مسافة 30 سم، وهذا مايمكن مقارنته مع نتائجنا في الجزء اليميني من الشكل حيث حصلنا على هذا الخطأ من أجل الأجسام الأبعد - عند 50 سم- بينما عند المسافات الأقرب - عند 35 سم - كانت نتائجنا أفضل.

علماً أنّ زاوية توضع الأجسام بالنسبة لكتلة الكشف فوق الصوتي تؤثر بشكل كبير على النموذج المقدر للبيئة، ومن أجل الأجسام الأبعد نجد أنّ خطأ تقدير عرض الأجسام وارتفاعها يزداد حيث يبلغ خطأ تقدير عرض الأجسام التي تتوضع على بعد 160 سم حوالي 66% أما خطأ تقدير الارتفاع فهو يختلف وفقاً لزاوية توضع الأجسام حيث حصلنا من أجل أجسام تتوضع على مسافة 80 سم على قيم تقديرية بخطأ 8% في أحسن الأحوال ، أيضاً بالنسبة لتقدير الفراغات بين الأجسام والتي تُعبّر عن ممرات آمنة للروبوت يُلاحظ أننا حصلنا على قياسات بخطأ 29% وهي ترتبط أيضاً بمسافة الأجسام وزاوية توضعها بالنسبة للروبوت، وعلى الرغم من أهمية هذه المناطق إلا أنه في المهام الاستكشافية يُمكن توجيه الروبوت إلى هذه المناطق والحصول على نتائج أكثر دقة.

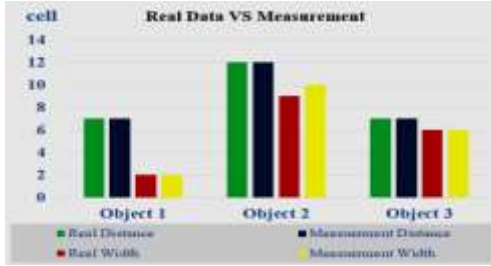
يُمكن تلخيص نتائج التجارب أعلاه وفق المخطط في الشكل (24)، الذي يوضّح قيم الخطأ عند تقدير كل من عرض الأجسام وارتفاعها وعند ثلاثة قيم مختلفة (35, 50, 75) سم لأبعاد الأجسام عن الروبوت، يتبين أنّ قيم الخطأ تزداد مع ازدياد بعد الأجسام عن الروبوت.



الشكل (24) مخطط يوضّح الأخطاء في تقدير عرض وارتفاع أجسام تتوضع على مسافات مختلفة

من أجل التجارب التي تم فيها بناء الخريطة لأجسام تتوضع على بعد 35 سم نجد أنّ قيم الخطأ

فعلياً هو عدد الخلايا الفارغة والمشغولة والذي يرتبط بدقة التمثيل (حجم خلايا الشبكة) وهو ما تحدده المتطلبات الفنية للروبوت بحد ذاته.



الشكل (27) مخطط يوضح أخطاء تقدير عرض وبعد

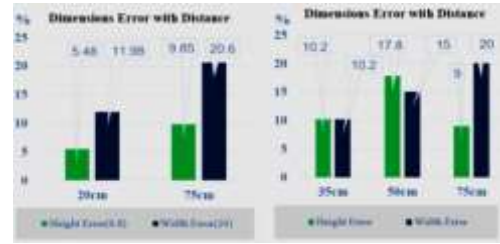
أجسام مقاسة بعدد الخلايا

يُظهر الشكل (27) مقارنةً بين القيم الحقيقية والقيم المقاسة من الخريطة الشبكية المرسومة بدقة 10 سم لكل من بعد وعرض ثلاثة أجسام، يتضح من الشكل أنّ الخريطة الشبكية وفق منظور الروبوت تعطي قيم دقيقة لأبعاد الأجسام الثلاثة مقاساً بعدد الخلايا، بينما بالنسبة لعرض الأجسام فإنّ الخريطة تعطي نتائج دقيقة بالنسبة للأجسام التي تتوضع حتى مسافة 74 سم - الجسم رقم 1 والجسم رقم 3 - والتي تكافئ سبع خلايا في الخريطة، بينما بالنسبة للجسم رقم 2 والذي يتوضع على بعد 120 سم والذي يكافئ 12 خلية، نجد أنّ خطأ تقدير العرض يبلغ 11.11 %

5 - الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذا البحث تنفيذ نظام تعرّف وكشف للبيئة المحيطة بروبوت، قادر على إعطاء خريطة ثلاثية الأبعاد، وذلك باستخدام حساسات فوق صوتية منخفضة التكلفة. تم إنجاز هذا البحث بالاعتماد على تقنية الأمواج فوق الصوتية واستثمار إمكاناتها باستخدام خوارزميات الإشغال الشبكية، حيث تم دراسة هذه الخوارزميات والطرق الرياضية المستخدمة في

وبالنسبة لأخطاء تقدير الارتفاع، يُمكن أنْ نتمعّن في النتائج التي حصل عليها (Fayaz Shaidib, 2013)، حيث قدّم المؤلف طريقة لتقدير بعد وعرض الأجسام عن طريق الدمج بين حساس فوق صوتي وكاميرا، يوضح الشكل (26) مقارنةً بين القيم التقديرية التي حصلنا عليها وبين القيم التي حصل عليها المؤلف.



الشكل (26) مقارنةً بين النتائج التي حصلنا عليها

وننتائج أعمال مماثلة في تقدير عرض وارتفاع الأجسام

يبين الجزء اليساري من الشكل (26) النتائج التي حصل عليها (Fayaz Shaidib, 2013) حيث حصل على خطأ 5.48% و 11.98% في تقدير ارتفاع وعرض جسم على التوالي، حيث يتوضع هذا الجسم على بعد 20 سم من الحساس، بينما من أجل المسافات الأبعد - عند 75 سم - فقد حصل المؤلف على خطأ 9.85% و 20.6% في تقدير قيم الارتفاع والعرض على التوالي، وبملاحظة نتائجنا الجزء اليميني من الشكل (26) - يتبين تقارب نتائجنا من نتائج (Fayaz Shaidib, 2013)، إلا أنّ نظام القياس لدينا يبقى أكثر تكيفاً مع البيئات المظلمة والتي تعطي وفق (Fayaz Shaidib, 2013) نتائج غير متوقعة.

ووفق منظور الروبوت لخلايا الخريطة الشبكية يُمكن الحصول على قيم تقديرية أفضل فيما يخصّ عرض الأجسام وبعدها عن كتلة الكشف فوق الصوتي الشكل (27)، عموماً وبالنسبة للروبوت يكون المهم

تمثيل البيئات الساكنة. عموماً يُمكن تلخيص الأعمال

المنفذة في البحث كالتالي:

- بناء نظام تحسس فوق صوتي يقوم بتقدير نموذج ثلاثي الأبعاد للبيئة المحيطة.
- بناء خريطة احتمالية ثلاثية الأبعاد من قياسات كتلة الكشف فوق الصوتي عن طريق توليف بارامترات خوارزمية Octomap.
- بناء طرفية برمجية لتوليف بارامترات كتلة الكشف فوق الصوتي، من أجل حالات الاختبار المختلفة. أثبتت نتائج التنفيذ العملي فعالية الخوارزمية المقترحة في تقديم نموذج مقبول ثلاثي الأبعاد للبيئة المحيطة، مع إمكانية استثمار هذا النظام على أغلب المنصات الروبوتية المبنية وفق نظام التشغيل ROS. تقدم النتائج التي حصلنا عليها نقطة الانطلاق لعدد كبير من الأبحاث فيما يتعلق بنمذجة البيئات المحيطة للروبوتات وتفتح أبواباً للبحث والتقصي في تقنيات الأمواج فوق الصوتية.
- يُمكن أن ننوه بآفاق العمل المستقبلية التي يُمكن للباحثين الغوص فيها:
- البحث في إمكانية الاستفادة من مناطق التقاطع بين الحساسات فوق الصوتية لتحسين دقة القياس.
- البحث في إمكانية استثمار الخريطة فوق الصوتية في مهام الملاحة باستخدام خوارزميات SLAM.
- البحث في استخدام حساسات أخرى مع الكتلة فوق الصوتية ودمجها لتحسين نموذج الخريطة.

- [10] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini and A. Taroni, Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, pp. 93--97, 1992.
- [11] C. Technologies, Product User's Manual-hc-sr04 Ultrasonic Sensor, Cytron Technologies Pulau Pinang, 2013.
- [12] M. A. N. A. M. S. Fazal Noor, A Method to Detect Object's Width with Ultrasonic Sensor, *2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering IEEE*, pp. 266-271, 2018.
- [13] M. W. U. M. K. H. H. M. Fayaz Shahdib, Obstacle Detection and Object Size Measurement for Autonomous Mobile Robot using Sensor, *International Journal of Computer Applications*, vol. 66, no. 9, p. 6, 2013.

Reference

- [1] S. Liu, L. Li, J. Tang, S. Wu and J.-L. Gaudiot, Creating Autonomous Vehicle Svstems, Morgan & Claypool, 2018.
- [2] A. Basha, H. Gupta, C. Perinbam, Sowmya, P. Ghosal and S. M., A Robot Controlled 3D Mapping and Communication System Using Ultrasonic Sensors, in *TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference*, Penang, Malaysia, 2017.
- [3] A. . S. Raj, A. Sushmitha and R. Bharath, 3D Surface Mapping using Ultrasonic Sensors, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, pp. 489-491, 2018.
- [4] K. Nakajima, C. Premachandra and K. Kato, 3D Environment Mapping and Self-Position Estimation by a, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 4, pp. 289--298, 2017.
- [5] C. Yi, S. Jeong² and J. Cho³ , Map Representation for Robots, *SmartCR*, vol. 2, pp. 18-27, 2012.
- [6] C. E. Johnson, Topological Mapping and Navigation in Real-World Environments, 2018.
- [7] N. Tomatis, Hybrid, metric-topological representation for localization and mapping, *Springer*, pp. 43--63, 2007.
- [8] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss and W. Burgard, OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees, *Autonomous robots*, vol. 34, pp. 189--206, 2013.
- [9] F. Rosique, P. Navarro, C. Fernández and A. Padilla, A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research, *Sensors*, vol. 19, p. 648, 2019.