

تحليل الخوارزميات الروبوتية لتجنب العوائق

الدكتور رزق غانم*

نبيلة العلان**

(تاريخ الإيداع 22 / 7 / 2013. قُبِلَ للنشر في 23 / 9 / 2013)

▽ ملخص ▽

تم في البحث دراسة الآليات اللازمة لتجنب العوائق المحتملة أمام حركة عربة روبوتية، إحدى الحالات الشائعة في البيئة الخارجية للعربة هو أن يتواجد على جانبي مسار العربة عوائق تفصلها عن بعضها مسافات، بحيث تقوم العربة بالمرور بين العوائق أو تلتف حولها، و يتحدد ذلك بناءً على الآلية المستخدمة في تجنب العوائق. قد تم تنفيذ هذه الآليات باستخدام برنامج التحليل الإحصائي (MATLAB) لعمل محاكي العربة الروبوتية التي تستخدم خوارزميات تجنب العوائق: بهدف كشف العوائق الممكنة أمام العربة و تجنب هذه العوائق. هذه الخوارزميات هي :

1. خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) [1]

2. خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) [2]

و قد وجدنا نتيجة للدراسة أن اختيار خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) تمكن العربة من المرور عبر المسافات الضيقة بين العوائق. و تتميز أيضاً هذه الخوارزمية بسهولة التطبيق، إلا أنها لا تأخذ بعين الاعتبار أبعاد العربة و حركيتها مما قد يؤدي إلى اصطدام العربة بالعوائق أو استعصائها. أما عندما طبقنا خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) وجدنا أن هذه الخوارزمية أعطتنا وصولاً أكثر أمناً إلى النقطة الهدف، حيث إننا نحصل على اصطدامات أقل بالعوائق و ذلك لأنها تأخذ بالاعتبار أبعاد العربة و حركيتها. إلا أن العربة تصبح غير قادرة على المرور بين الفراغات الضيقة مما يجعلها تسلك مسارات أطول.

الكلمات المفتاحية: تجنب العوائق, خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH), خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+), خوارزمية حقول القوى الافتراضية (VFF).

* مدرس - قسم هندسة الحواسيب و الأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية
** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - الهندسة الروبوتية - قسم هندسة الحواسيب - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية جامعة دمشق - دمشق - سورية.

The study and Analysis of Robotic Algorithms to Avoid Obstacles The study and Analysis of Robotic Algorithms to Avoid Obstacles

Dr. Rezq Ghanem*
Nabila Al Allan**

(Received 22 / 7 / 2013. Accepted 23 / 9 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

In this research, the study of methods needed to avoid the potential obstacles of the movement of robotic vehicles has been done. One of the common conditions in the external environment of the vehicle is to be located on both sides of its path obstacles separated by spaces where the vehicle can pass between the obstacles or turn around them; that depends on the applied methods to avoid obstacles. The implementation of these mechanisms (Methods) has been applied using statistical analysis software (MATLAB) to make a robotic vehicle simulator that uses algorithms to avoid obstacles. Those algorithms are:

1. The algorithm of Vector Field Histogram (VFH)[1]
2. The algorithm of Vector Field Histogram Plus (VFH+)[2]

We have found as a result of the study that the choice of the algorithm of Vector Field Histogram (VFH) enables the vehicle to pass through the narrow spaces between the obstacles. Also, the (VFH) is easy to be applied, but it does not take into account the dimensions of the vehicle and its dynamics, which could lead to collisions with the obstacles or stopping the vehicle. But when we applied the algorithm of Vector Field Histogram Plus (VFH+), we found that this algorithm gave us more secure access to the target point, where we are getting less collision with the obstacles because this method takes into account the dimensions of the vehicle and its dynamics. However, the vehicle is less able to pass through narrow spaces; something which makes the vehicle takes longer paths to go through.

Keywords: obstacle avoidance ,Vector Field Histogram (VFH),Vector Field Histogram Plus (VFH+),Virtual Forces Field (VFF).

* Assistant Professor, Computer and Automation Department, Faculty of mechanical and electrical engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

** Postgraduate student of robotic designing and engineering, Computer and Automation Department , Faculty of mechanical and electrical engineering University, Damascus, Syria.

مقدمة:

تعتبر التقنية المستخدمة في تسيير العربات الروبوتية بشكل ذاتي التحكم إحدى المشاريع الواعدة في مجال الصناعة التكنولوجية المتطورة. توفر بيئة المحاكاة باستخدام برنامج التحليل الإحصائي (MATLAB) الطريقة الأمثل لدراسة و تحليل هذه التقنيات. حيث تم في البحث دراسة حركة هذه العربات الروبوتية و تسييرها على مسار محدد، مع إعطاء القدرة على التحكم في معادلات هذه العربة، لإيصالها إلى النقطة الهدف دون الاصطدام بالعوائق. تم إجراء البحث في جامعة دمشق و قد استغرق البحث مدة السنتين و النصف. هناك أعمال عديدة تتعلق بمواضيع مشابهة للبحث، مثل مشروع القوى الذكية (IFOR) Intelligent Forces في جامعة Umea [3]، حيث تم دراسة محاكاة لعربة روبوتية ذاتية التحكم تعمل في بيئة غابة، بحيث يقوم الروبوت بنقل الأخشاب من منطقة التعبئة إلى الطريق الرئيسي بدون سائق و بدون اصطدام بالعوائق. مما أدى إلى توفير النقل من مناطق التعبئة على طريق محدد من أجل نقل آمن و توفير باليد العاملة.

يعتبر البحث هو تطبيق مباشر لخوارزميات كشف العوائق و تجنبها. وتعتمد هذه الخوارزميات على خوارزمية حقل القوى الافتراضية (VFF) Virtual Forces Field [1].

أهمية البحث وأهدافه:

هو تطوير عربة روبوتية بدون سائق بحيث تكون قادرة على تجنب العوائق المحتملة في طريقها من خلال تطبيق خوارزميات لكشف العوائق التي تصادف العربة أثناء حركتها و القيام بتجنبها. تم في البحث دراسة و تحليل خوارزميات تجنب العوائق، و تنفيذها على عربة روبوتية على شكل شاحنة متمفصلة في الوسط، و ذلك عن طريق بناء محاكي لهذه العربة باستخدام برنامج التحليل الإحصائي (MATLAB)، الذي تم من خلاله بناء خوارزميات للتحكم بحركة الروبوت بدون سائق، مما يعطي البحث أهمية أكاديمية و علمية من حيث توفير النقل الآمن، و كما يوفر باليد العاملة.

طرائق البحث و موادها:

تم في البحث استخدام برنامج التحليل الإحصائي (MATLAB) من أجل بناء محاكي للعربة الروبوتية بحيث يمكننا من التحكم بالعربة، من خلال دراسة و تحليل خوارزميات تجنب العوائق، و من ثم عمل مقارنة بينها من حيث الأداء المتعلق بسرعة الوصول إلى النقطة الهدف، و الوصول الآمن إليها دون الاصطدام بالعوائق أو الدخول في حالة استعصاء للعربة.

تعتبر مسألة كشف العوائق التي قد تصادف العربة و مسألة تجنبها قضية هامة من أجل تطوير عربة روبوتية ذاتية التحكم قادرة على اجتياز المسار المحدد لها دون الاصطدام بالعوائق التي قد تواجهها. يتم في بعض التطبيقات استخدام طريقة تتبّع الحائط لتجنب العوائق، حيث تقوم العربة بالعبور في ممرات و تقوم بتتبع حائط هذه الممرات، فإذا صادفها عائق أثناء حركتها فإنها تعتبره حائطاً و تقوم بالدوران حوله على مسافة أمان محددة، إلى أن تسترد العربة مسارها المحدد، أما في التطبيقات الأكثر تعقيداً فإننا نحتاج إلى كشف العوائق و تحديد حجمها و مجالها بحيث تصبح

العربة قادرة على الاختيار بين العبور بين العوائق أو الالتفاف حولها، بحيث تحقق العودة الآمنة إلى المسار بدون الاصطدام بالعوائق.

تم في البحث استخدام خوارزميتين من أجل كشف العوائق وتجنبها و هما :

1- خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) [1] Vector Field Histogram

2- خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) [2] Vector Field Histogram Plus .

تعتمد الخوارزميات الممثلة في البحث على خوارزمية حقل القوى الافتراضية (VFF) Virtual Forces Field [1] في أسسها النظرية و العملية .

3-1- خوارزمية حقل القوى الافتراضية (VFF) Virtual Forces Field [1]:

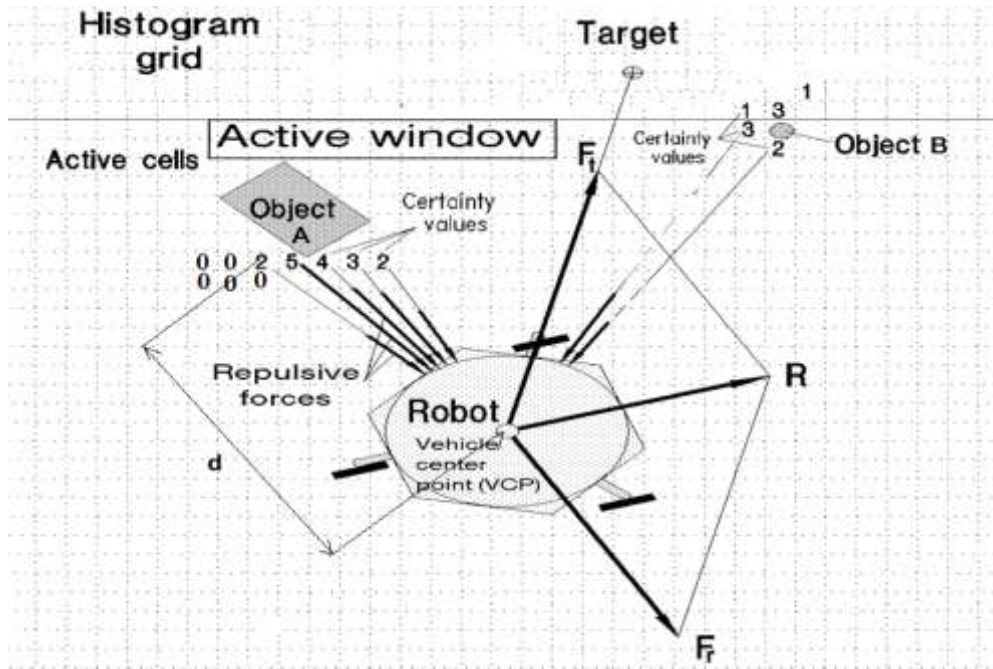
تعتبر خوارزمية حقل القوى الافتراضية (VFF) أن كل عائق على المسار يطبق شعاع قوة نابذة على العربة عندما تكون العربة ضمن مجال معين. و يكون مطال هذا العائق متناسباً عكسياً مع مربع المسافة بين العائق و العربة.

يكون تأثير شعاع القوة النابذة الناتج عن العائق بحيث يدفع العربة بعيداً عن العائق، في حين تطبق النقطة الهدف التي تسعى العربة إلى الوصول إليها عبر مسارها شعاع قوة جاذبة للعربة من أجل سحبها باتجاهها، و بالنتيجة نحصل على محصلة للقوى الجاذبة و النابذة تحدد بشعاع يعطي الاتجاه الذي يجب أن تسلكه العربة متجنباً العوائق التي قد تصادفها. كما يظهر في الشكل (1).

يتم في هذه الخوارزمية بناء شبكة هيستوغرام تسمى بشبكة الدقة (certainty grid)، تقوم بتقسيم البيئة المحيطة بالعربة إلى شبكة من الخلايا بحيث تحوي كل خلية على قيمة تسمى قيمة الدقة، و التي تعبر عن احتمالية وجود عائق (عدد مرات كشف الحاجز من قبل الحساسات المركبة على العربة الروبوتية) [4] .

يوضح الشكل (1) عربة روبوتية ضمن شبكة الهيستوغرام، تخضع هذه العربة إلى محصلة قوى نابذة (F_r) ناتجة عن الجمع الشعاعي للقوى النابذة الناتجة عن العائقين (Object A) و (Object B) و إلى القوة الجاذبة الناتجة عن النقطة الهدف (النقطة التي يجب وصول العربة إليها) الممثلة بالشعاع (F_t). إن محصلة القوى المؤثرة على العربة الروبوتية هي (R).

في كل خلية من شبكة الهيستوغرام الموضحة في الشكل يوجد قراءة تدل على عدد المرات التي يرى فيها الحساس العائق، فمثلاً الخلية التي تحمل قيمة الدقة (4) تدل على احتمالية أكبر لوجود العائق من الخلية التي تحمل الرقم (2)، بينما يدل الرقم (0) على عدم وجود عائق. يتناسب مطال القوة النابذة عكساً مع المسافة بين الخلية الفعالة و العربة (d)، يتناسب أيضاً مطال القوة النابذة مع قيمة الدقة في الخلية.



الشكل (1) مفهوم خوارزمية الحقل الشعاعي الافتراضي (VFF)

3-2- خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) [1]

تعتمد هذه الخوارزمية في بناء هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) على طريقة حقول القوى الافتراضية (VFF) [1].

يتم في خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) عمل ثلاثة مستويات لتمثيل البيانات:

المستوى الأول: يحتفظ المستوى الأول بتوصيف تفاصيل بيئة العربة، حيث يستخدم شبكة هيستوغرام ثنائية البعد لتخزين البيانات عن العوائق، كما يتوضح من شبكة الدقة المماثلة في شبكة الدقة لخوارزمية حقل القوى الافتراضية (VFF) [1] في الشكل (1).

المستوى الثاني: يتم بناء هيستوغرام قطبي وحيد البعد، من خلال ربط شبكة الدقة بهيستوغرام قطبي:

إنشاء الهيستوغرام القطبي:

يتم تقسيم الهيستوغرام في المستوى الأول إلى عدد من القطاعات الزاوية (n)، تم في البحث التقسيم إلى (n=72) قطاعاً زاوياً (بعرض $\alpha = 5^\circ$ لكل قطاع). في كل قطاع يتم استخدام محتوى الخلايا في هذا القطاع لإنشاء شعاع العائق ذو المطال (m) الذي يكون متناسباً مع (-d) حيث d هي المسافة بين العائق و العربة، كما هو موضح في الشكل (1). أي أنه نحصل على مطال أكبر كلما اقتربت العربة من العائق. و يعطى مطال شعاع العائق بالعلاقة:

$$m_{i,j} = (C_{i,j}^*)^2(a-bd_{i,j}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

و يعطى اتجاه شعاع العائق $\beta_{i,j}$: و هو زاوية الاتجاه من الخلية (i,j) (حيث i تمثل رقم السطر في الشبكة

الهيستوغرامية و j تمثل رقم العمود في الشبكة الهيستوغرامية و تكون (x_i, y_j) هي إحداثيات الخلية (i,j) وفقاً للإحداثيات الديكارتية) و إلى النقطة المركزية للعربة Vehicle Center Point (VCP) المعرفة بالعلاقة :

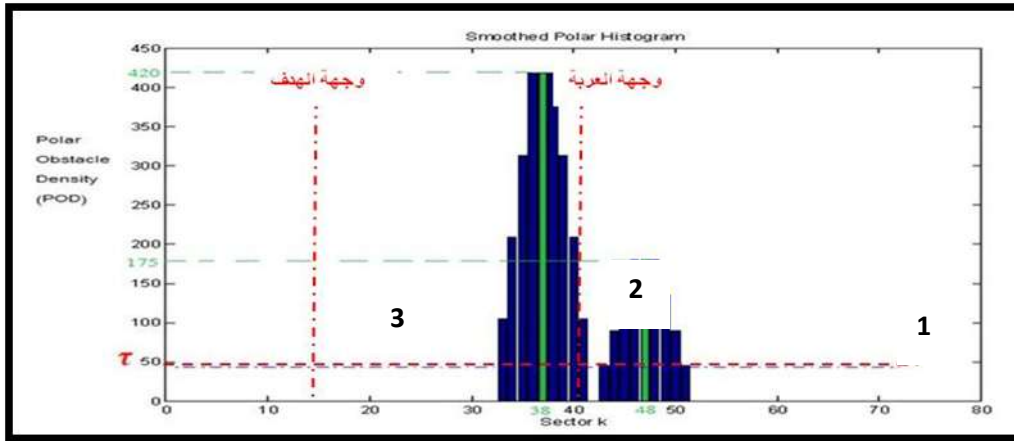
$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{y_j - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

<p>a, b: ثوابت موجبة يتم اختيارها بحيث تحقق العلاقة التالية:</p> $a - bd_{max} = 0 \dots \dots \dots (3)$ <p>حيث d_{max}: هي المسافة إلى الخلية الفعالة الأبعد. هذا يعني أن $m_{i,j} = 0$ من أجل الخلية الفعالة الأبعد و تزداد بالاقتراب من العربة.</p> <p>$m_{i,j}$: هي مطال شعاع العائق في الخلية (i,j).</p>	<p>$C_{i,j}^*$: قيمة الدقة (certainty value) للخلية الفعالة (i,j).</p> <p>$d_{i,j}$: المسافة بين الخلية الفعالة (i,j) و VCP</p> <p>x_0, y_0: الإحداثيات الحالية للنقطة المركزية للعربة VCP</p> <p>x_i, y_j: إحداثيات الخلية الحالية الفعالة الحالية (i,j)</p> <p>$\beta_{i,j}$: الاتجاه من الخلية الفعالة (i,j) إلى VCP</p>
---	--

يتم عادةً تعريف كثافة العائق القطبية h_k من أجل كل قطاع k على أنها مجموع مطالات أشعة القوى ضمن ذلك القطاع، و لكن قد تم في البحث اعتبار أن h_k تمثل مطال شعاع العائق الأقرب إلى العربة فقط، أي المطال الأكبر $\max(m_{i,j})$ بين مطالات أشعة العوائق، و ذلك للتقليل من حجم البيانات المعالجة. و يعطى h_k بالعلاقة التالية :

$$h_k = \max(m_{i,j}) \quad i,j \in k \quad \dots \dots \dots (4)$$

يوضح الشكل (2) هيستوغرام قطبي على محوره الشاقولي توزيع الكثافة القطبية للعائق، و التي تساوي قيمة مطال الشعاع الناخذ الأعظمي في القطاع حسب العلاقات (1) و (4). أما المحور الأفقي فيعبر عن القطاعات التي عددها n المقسمة للشبكة. عند القطاع $k = 38$ يسجل الحساس قيمةً لمطال الشعاع الأعظمي تعطي قيمة كثافة قطبية تساوي (420).



الشكل (2) الهيستوغرام القطبي

يظهر الشكلان المظللان في الهيستوغرام القطبي وجود عائقين أمام العربة الروبوتية، الممر الأبيض بين الكتلتين يعبر عن ممر يطلق عليه وادي مرشح. المطال في الكتلة على اليمين أقل منه على اليسار، مما يدل على أن العائق على اليمين أبعد. هناك قيمة حدية (τ) تعبر عن العتبة الدنيا للكثافة القطبية للعائق التي يُحتمل أن تكون القيم

التي تصغرنا ناتجة عن ضجيج بالحساسات أو عن عائق بعيد لا نأخذ تأثيره بعين الاعتبار. لذلك يمكننا إهمال قيم الكثافة القطبية الواقعة تحت هذه القيمة.

المستوى الثالث:

يتم في هذا المستوى من معالجة البيانات تحديد زاوية توجيه العربة الأفضل (ψ) بالطريقة التالية. بالنظر إلى الشكل (2) يعتبر القطاع في شبكة الهيستوغرام القطبي قطاعاً حراً إذا لم يحتو على العوائق. إذا وجد عدد متتالي من القطاعات الحرة بحيث تشكل ممر كاف لمرور العربة من خلاله فإننا نسمي هذا الممر بالوادي المرشح، إذا كان هذا الممر ضيقاً و يكفي فقط لمرور العربة في وسطه بحيث أنها قد تصطدم إذا انحرفت عن وسط هذا الممر فإننا نسميه وادي مرشح ضيق، أما إذا كان عرض هذا الممر كبيراً بما يكفي لمرور العربة في عدة اتجاهات فإننا نسميه وادي مرشح عريض، و فيه يمكن للعربة أن تختار الذهاب إلى يسار هذا الممر أو وسطه أو يمينه. في طريقة هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) يتم اختيار الاتجاه (زاوية توجيه العربة ψ) الذي تذهب فيه العربة بحيث يكون الاتجاه الأقرب لاتجاه الهدف بالنسبة للعربة الروبوتية. ففي الشكل (2) أمام العربة ثلاثة وديان مرشحة (1,2,3) تظهر كمساحات بيضاء على الهيستوغرام، يختار الروبوت الوادي المرشح (3) ، أي يتم تحديد زاوية توجيه العربة (ψ) حسب اتجاه وجهة الهدف.

3-3- خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) [2]

تعتبر خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) تطويراً لخوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH). يكون الفرق الرئيسي بين هاتين الخوارزميتين هو: أنه في هذه الخوارزمية استخدمنا مربع المسافة بين الخلية الفعالة و العربة (d^2) في حساب مطالات الأشعة النابذة و يعطى المطال وفق هذه الطريقة بالعلاقة التالية:

$$m_{i,j} = (C_{i,j}^*)^2 (a - b d_{i,j}^2) \dots \dots \dots (5)$$

إن الشعاع النابذ الناتج عن العائق له زاوية اتجاه $\beta_{i,j}$ يتم تحديدها باستخدام خوارزمية VFH كما في العلاقة (2)

3-3-1- إنشاء الهيستوغرام القطبي الأساسي Primary Polar Histogram:

بشكل مشابه لما تم في (VFH)، نقوم بإنشاء هيستوغرام قطبي يمثل قيم الكثافة القطبية للعائق في كل قطاع، إلا أنه في طريقة هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) لم يتم أخذ أبعاد العربة (عرض العربة) بعين الاعتبار ، مما يعني توقع اصطدام طرف العربة بالعائق عند أبعاد كبيرة للعربة، لذا تم حل هذه المشكلة في طريقة هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) برسم الهيستوغرام القطبي الأساسي. و فيه نقوم بتكبير نصف قطر كل خلية عائق (وهي الخلية التي تحتوي قيمة دقة تدل على وجود عائق) وفق المعادلة:

$$r_{r+s} = r_r + d_s \dots \dots \dots (6)$$

d_s : هي أصغر مسافة بين العربة و العائق.

r_r : هو نصف قطر العربة الروبوتية و هو المسافة بين النقطة المركزية للعربة Vehicle Center Point (VCP) و أبعد نقطة في العربة الروبوتية عنها (عن VCP) و بذلك تصبح خلية العائق تمتد على عدة قطاعات. و

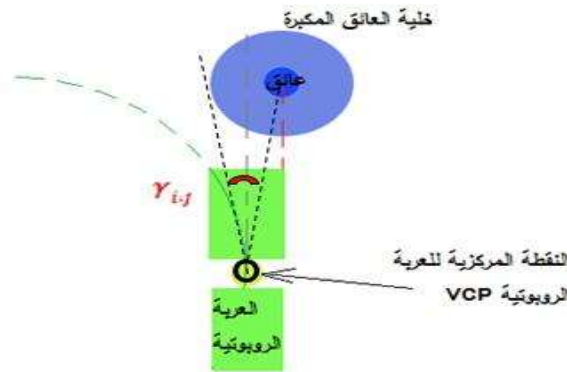
باعتبار $(\gamma_{i,j})$ هي زاوية تكبير خلية العائق: الزاوية بين شعاع العائق (من مركز العائق إلى VCP) و الشعاع المار بين (VCP) للعربة و نقطة المماس منها على الخلية المكبرة، كما يتوضح في الشكل (3).

نفرض من أجل كل قطاع k فإنه يتم حساب كثافة العائق القطبية وفق العلاقات التالية:

$$H_k^p = \left(\max(m_{i,j}) \right) h'_{i,j} \quad i,j \in k \quad \dots \dots \dots (7)$$

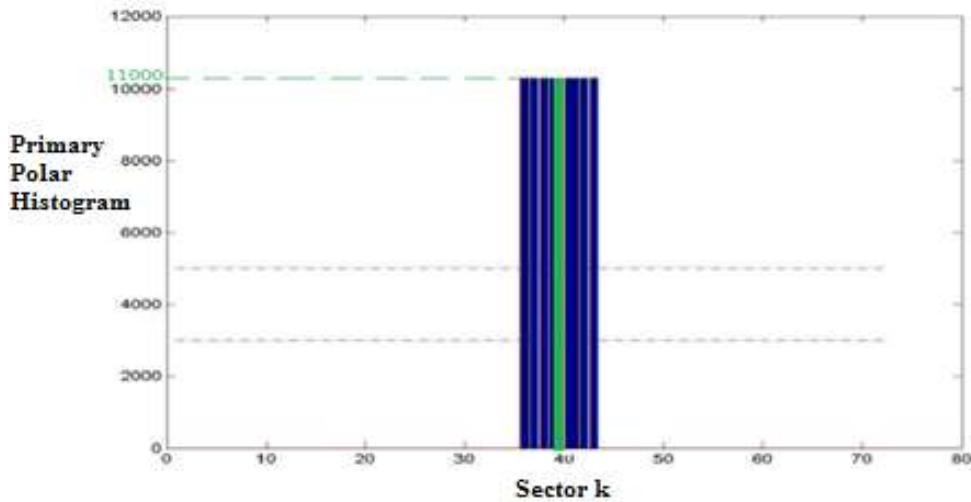
$$\left. \begin{array}{l} h'_{i,j} = 1 : \quad \text{بحيث } k\alpha \in [\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}] \\ h'_{i,j} = 0 : \quad < \text{بالحالات الأخرى} > \end{array} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

حيث k : هو رقم القطاع المدروس، α : قيمة الدقة الزاوية للقطاع و أخذت في البحث $\alpha = 5^\circ$ يوضح الشكل (3) عربة روبوتية مع وجود عائق و قمنا فيه بأخذ أبعاد العربة بعين الاعتبار.



الشكل (3) وجود عائق و تحرك العربة مع أخذ أبعاد العربة بعين الاعتبار

عندما تمتد احتمالية وجود عائق على مساحة أكبر، عندها يكون العائق موجود في مركز المجال، و المجال حوله سيجعل العربة تبتعد عن العائق بمسافة أمان، و بما أن التكبير يتم حسب نصف قطر العربة (r_r) فمهما كبر عرض العربة فسوف لن تصطدم بالعائق الفعلي. [4]. أنظر العلاقة (6) في الشكل (4) تم بناء الهيستوغرام القطبي الأساسي و ذلك وفقاً للعلاقات (7) و (8)، حيث يوجد عائق عند القطاع 40 وقيمة الكثافة القطبية للعائق عند هذا القطاع هي 11000.



الشكل (4) الهيستوغرام القطبي الأساسي في VFH+

3-3-2- إنشاء الهيستوغرام القطبي الإثنائي Binary Polar Histogram :

يتم بالاعتماد على الهيستوغرام القطبي الأساسي السابق إنشاء هيستوغرام قطبي إثنائي، فبدلاً من استخدام قيم الكثافة القطبية يستخدم الهيستوغرام القطبي الإثنائي القيم (0) و (1). فإذا كان القطاع حراً (لا يحوي عائق) فإن تابع الهيستوغرام يأخذ القيمة (0) أما إذا كان القطاع محجوراً بعائق فإنه يأخذ القيمة (1). و خلافاً لخوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي VFH، التي تستخدم قيمة عتبة واحدة (τ) لمعالجة البيانات، فإن خوارزمية (VFH+) تستخدم عتبتين حديتين هما τ_{low} و τ_{high} . يتم التعامل مع قيمة القطاع الواقعة بين هاتين العتبتين حسب قيمة القطاع الذي يسبقه فإذا كان القطاع السابق محجوراً فإن قيمة القطاع ستكون (1) و إذا كان حراً فإن قيمة القطاع ستكون (0). [4]

إن معالجة المعطيات ضمن المجال الكائن بين هاتين العتبتين، كما تبين بهذه الطريقة، يتيح قدرة تجنب أكثر للعبئة الروبوتية.

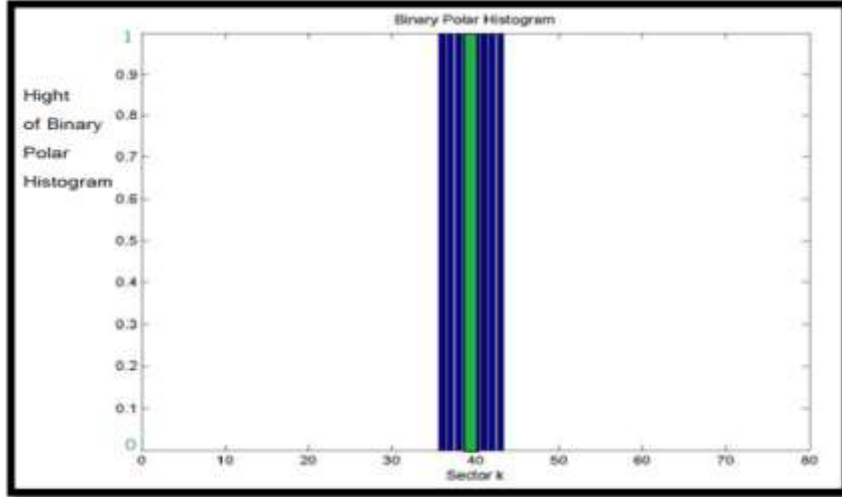
القيم أعلى من (τ_{high}) يتم أخذها بالاعتبار، أما القيم أسفل (τ_{low}) فيتم إهمالها لأنها قد تحتوي على ضجيج.

من أجل بناء الهيستوغرام القطبي الإثنائي نطبق التابع التالي [4]:

$$\left. \begin{aligned} H_k^b &= 1 && \text{بحيث } H_k^p > \tau_{high} \\ H_k^b &= 0 && \text{بحيث } H_k^p < \tau_{low} \\ H_{k-1}^b &&& < \text{في حالات الأخرى} > \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

حيث : H_k^b : ارتفاع الهيستوغرام الإثنائي للقطاع (k) قيمة الكثافة القطبية للقطاع k مأخوذة من الهيستوغرام القطبي الأساسي.

و يبين الشكل (5) تمثيل بياني لتابع الهيستوغرام القطبي الإثنائي حيث يوجد عائق عند القطاع 40، و يكون الارتفاع للهيستوغرام الإثنائي له هو (1)، و يمتد تأثير العائق على عدة قطاعات مجاورة وفقاً لما درسناه في الهيستوغرام الأساسي.

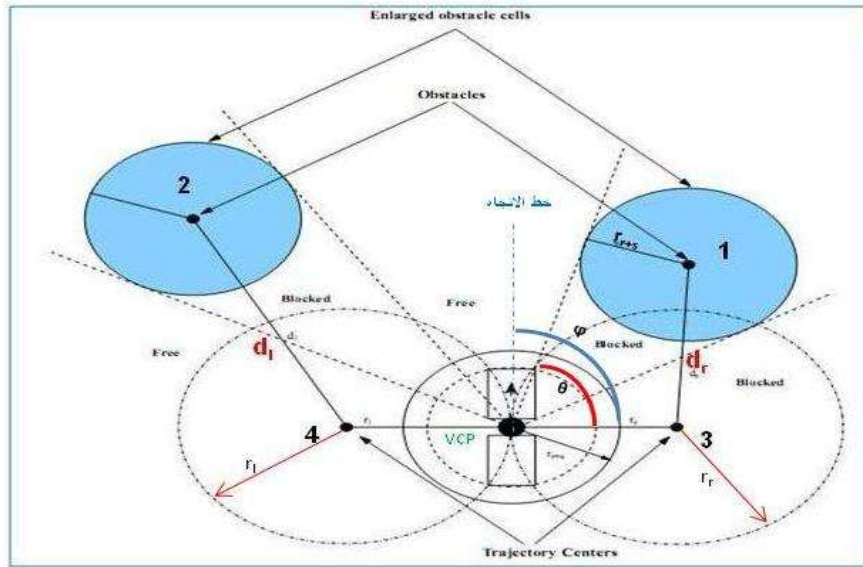


الشكل (5) تمثيل بياني لتابع الهيستوغرام القطبي الإثنائي

3-3-3- الآلية المستخدمة لأخذ حركة العربة بعين الاعتبار

3-3-3-1 - الخطوات المتبعة في إدخال حركة العربة بعين الاعتبار:

تأخذ خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH^+) بعين الاعتبار حركة العربة، خلافاً لخوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH) حيث كانت (VFH) تفترض أن العربة يمكنها أن تتحرك في أي اتجاه لايحوي عوائق مما قد يؤدي إلى اختيار زوايا توجيه تحتاج لدوران حاد للعربة قد يؤدي إلى اصطدامها بالعوائق. حلت (VFH^+) هذه المشكلة من خلال إنشاء هيستوغرام قطبي مقنع و ذلك وفق الخطوات التي يوضحها الشكل (6).



الشكل (6) : يوضح الآلية المستخدمة لأخذ حركية العربة بعين الاعتبار في تحديد الاتجاهات المحجوزة

يوضح الشكل (6) الآلية المستخدمة لأخذ حركية العربة بعين الاعتبار كشرط إضافي يمنع تصادم العربة في حال الدوران.

يُظهر الشكل (6) وجود عائقين (1) و (2)، يبعد العائق (1) عن مركز المسار (3) المسافة (d_r) ، و يبعد العائق (2) عن مركز المسار (4) المسافة (d_i) .

من أجل أخذ حركية العربة بعين الاعتبار نقوم بما يلي :

نعرف دائرتين على كل جانب للعربة تحددان المسارات الأعظمية التي تسلكها العربة وفقاً لنصف قطر الدوران الأعظمي للعربة، كما في الشكل (6) الذي يمثل المسارات اليسارية واليمنية عند زاوية توجيه أعظمية φ والتي تمثل أعظم زاوية يمكن تدوير العربة بها و تعود قيمتها الى الخصائص الفيزيائية للعربة و قد افترضنا أن البحث تم على عربة زاوية توجيهها الأعظمية هي $(\varphi = 40^\circ)$ ، إحداثيات المراكز لهذه الدوائر معرفة كما يلي:

$$\Delta x_r = r_r * \sin\theta \quad \Delta y_r = r_r * \cos\theta \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$\Delta x_i = r_i * \sin\theta \quad \Delta y_i = -r_i * \cos\theta \quad \dots \dots \dots (11)$$

حيث: r_r و r_i : أنصاف قطر الدوائر ذات مراكز المسار (3) و(4) اليمينية واليسارية على التوالي

θ : زاوية الوجهة للعربة : و هي الزاوية التي سوف تسير بها العربة اذا كانت زاوية التوجيه صفراً أي عندما يكون الجزء الأمامي و الجزء الخلفي للعربة على نفس الاستقامة.

Δx و Δy : المسافة من مركز العربة (VCP) إلى مركز المسار.

تعطى المسافة بين عائق ما في الخلية C_{ij} ومركزي المسار بالعلاقة:

$$d_r^2 = (\Delta x_r - \Delta x(i))^2 + (\Delta y_r - \Delta y(j))^2 \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$d_i^2 = (\Delta x_i - \Delta x(i))^2 + (\Delta y_i - \Delta y(j))^2 \quad \dots \dots \dots (13)$$

حيث:

Vehicle Center Point(VCP) ومركز العربة $\Delta x(i)$ و $\Delta y(j)$ هي المسافة بين الخلية العائق (i,j) ومركز العربة

يكون الاتجاه على يمين عائق ما محجوزاً إذا تحقق الشرط التالي:

$$d_r^2 < (r_r + r_{r+s}) \dots \dots \dots (14) \quad \text{[الشرط 1]}$$

d_r : هي المسافة بين عائق ما في الخلية (i,j) و مركز المسار الأيمن	r_{r+s} : نصف قطر خلية العائق المكبرة
	r_r : نصف قطر الدائرة ذات مركز المسار الأيمن

يكون الاتجاه على يسار عائق ما محجوزاً إذا تحقق الشرط التالي:

$$d_l^2 < (r_l + r_{l+s}) \dots \dots \dots (15) \quad \text{[الشرط 2]}$$

d_r : هي المسافة بين عائق ما في الخلية (i,j) و مركز المسار الأيسر	r_{r+s} : نصف قطر الدائرة ذات مركز المسار الأيسر
	r_l : نصف قطر الدائرة ذات مركز المسار الأيسر

يمكننا بتطبيق هذين الشرطين من أجل كل خلية عائق، أن نحصل على زاويتي توجيه حديتين φ_l, φ_r تحددان

باتباع الخطوات التالية

1-نعرف أولاً زاوية التوجيه φ_b بحيث $(\varphi_b = \theta + \pi)$ حيث (θ) هي زاوية الوجهة الحالية للعربة

نعطي قيم أولية للزاويا φ_l و φ_r بحيث: $\varphi_r = \varphi_b$ ، $\varphi_l = \varphi_b$:

2-من أجل خلية عائق $C_{i,j}$: يكون زاوية اتجاه الشعاع النابذ في الخلية $C_{i,j}$ وهو الزاوية بين العربة و

خلية العائق (i,j) و التي تحسب من العلاقة (2).

أ- إذا كانت $\beta_{i,j}$ في (2) على يمين θ و على يسار φ_r ، نفحص الشرط 1 في العلاقة (14). إذا

تحقق الشرط، عندها نعتبر $\beta_{i,j} = \varphi_r$.

ب- إذا كانت $\beta_{i,j}$ على يسار θ و على يمين φ_l ، نفحص الشرط 2 في العلاقة (15). فإذا تحقق

الشرط، عندها نعتبر $\beta_{i,j} = \varphi_l$. من أجل تحديد إذا كانت الزاوية a1 على يسار أو على يمين a2 نستخدم

الخوارزمية التالية:

```
compAngles (a1,a2)
{  a3 = (a2+π)mod 2 π //directly backwards from //a2 (180°)
  if(a1 = a2)  return 'forward'
  else if (a2 ≤ π)
  { if (a1>a2 & a1<a3)  return 'left'
    Else  return 'right'
  }
  Else
  { if(a1<a2 & a1>a3)  return 'right'
    Else  return 'left'  }  }
```

الآن أصبح بإمكاننا بناء الهستوغرام القطبي المقنع Masked Polar Histogram بمساعدة الهستوغرام

القطبي الإثنائي و زوايا التوجيه φ_l, φ_r كما يلي:

3-3-2- إنشاء الهستوغرام القطبي المقنع Masked Polar Histogram:

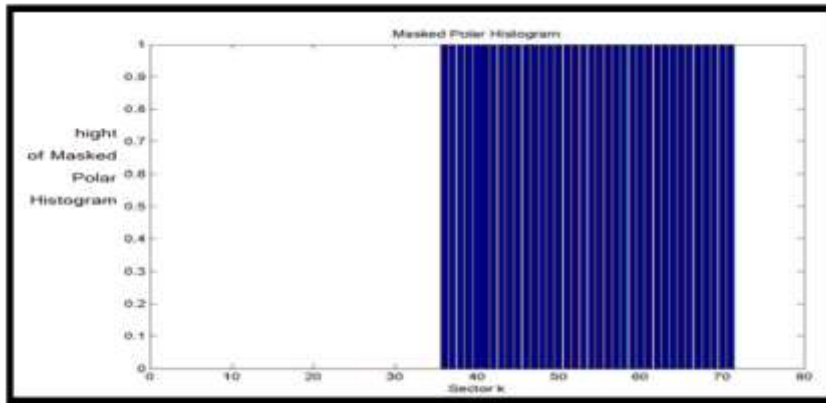
يتم إنشاء الهستوغرام القطبي المقنع "Masked Polar Histogram" H^m بمساعدة الهستوغرام القطبي الإثنائي "Binary Polar Histogram" و φ_r و φ_l وفق المعادلة التالية:

$$H_k^m = 0 \quad \text{if } H_k^b \text{ and } (k * \alpha) \in \{[\varphi_r, \theta], [\theta, \varphi_l]\} \dots \dots \dots (16)$$

$$H_k^m = 1 \quad \text{otherwise}$$

حيث H_k^m : إرتفاع الهستوغرام القطبي المقنع للقطاع k	$[\varphi_r, \theta]$: المجال الزاوي بين زاوية الوجهة للعربة و زاوية التوجيه الأعظمية φ_r نحو اليمين
k: رقم القطاع المدروس	$[\theta, \varphi_l]$: المجال الزاوي بين زاوية الوجهة للعربة و زاوية التوجيه الأعظمية φ_l نحو اليسار
α : الدقة الزاوية للقطاع	

بالتمثيل البياني لتابع الهستوغرام القطبي المقنع نحصل على الشكل (7).



الشكل (7) الهستوغرام القطبي المقنع

نلاحظ في الشكل (7) وجود منطقة واسعة محجوزة لا يمكن للعربة المرور عبرها و لكن لازال هناك قطاعات حرة بدون عوائق (اللون الأبيض) تشكل وادي مرشح عريض يمكن للعربة المرور من خلاله: حيث يمكنها أن تتحرك على يمين هذا الوادي أو على يساره أو أن تختار المرور من مركزه. يحوي كل وادي مرشح عدداً من الاتجاهات المرشحة التي يمكن للعربة أن تسلكها، أي أن تختار واحداً من ثلاثة اتجاهات. و يتم اختيار الاتجاه الأفضل لانتقال العربة من بين تلك الاتجاهات المرشحة بأسلوب مشابه لما تم في خوارزمية هستوغرام الحقل الشعاعي (VFH)، إلا أن خوارزمية هستوغرام الحقل الشعاعي VFH تختار الذهاب في الاتجاه الأقرب إلى اتجاه الهدف بالنسبة للعربة. أما في خوارزمية هستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+)[2] فيتم الاختيار بين الاتجاهات المرشحة لمرور العربة ضمن الوادي باستخدام تابع كلفة (cost function) (g) [2] الذي نطبقه على كل اتجاه مرشح يمكن للعربة المرور به. يبين تابع الكلفة هذا مدى صعوبة الذهاب في هذا الاتجاه، و من ثم يتم اختيار المرور في الاتجاه الموافق لدرجة الصعوبة الأقل و بالتالي أقل قيمة كلفة للتابع (g) حيث :

$$g(c) = \mu_1 * \Delta(C, k_t) + \mu_2 * \Delta\left(C, \frac{\theta_i}{\alpha}\right) + \mu_3 * \Delta(C, k_{i-1}) \dots \dots \dots (17)$$

<p>(i) رقم القطاع السابق للقطاع k_{i-1} C : رقم القطاع المرشح لمرور العربة عبره (الاتجاه المرشح للمرور خلاله)</p>	<p>μ_1, μ_2, μ_3 : هي معاملات الكلفة ، و هي تتحكم بأهمية كل حد من حدود تابع الكلفة g k_t : رقم القطاع الذي توجد ضمنه النقطة الهدف θ_i : الوجهة الحالية</p>
--	---

$\Delta(c_1, c_2)$: هو القيمة الدنيا (min) في المجموعة التي عناصرها تمثل عدد القطاعات بين قطاعين (c_1) ،
 (c_2) :

حيث (c_1) رقم القطاع (1) ، (c_2) رقم القطاع (2) ، n هي
 العدد الكلي للقطاعات.

$$\Delta(c_1, c_2) = \min\{|c_1 - c_2|, |c_1 - c_2 - n|, |c_1 - c_2 + n|\} \dots \dots \dots (18)$$

في العلاقة (18) نطبق هذا التابع بين القطاعين (C, k_{i-1}) ، و القطاعين $(C, \frac{\theta_i}{\alpha})$ ، وكذلك بين القطاعين
 (C, k_t) . نلاحظ من معادلة تابع الكلفة في العلاقة (17) أنه يقسم إلى ثلاثة حدود تمثل ما يلي :

1-يمثل الحد الأول حد كلفة (صعوبة) المرور في الاتجاه المرشح الأقرب إلى اتجاه الهدف بالنسبة للعربة.
 كلما كبر الفرق بين الاتجاه المرشح و اتجاه الهدف كلما كبرت قيمة الكلفة. و يشابه هذا السلوك خوارزمية الحقل
 الشعاعي VFH

2-يمثل الحد الثاني كلفة المرور في الاتجاه المرشح بمقارنته مع الوجهة الحالية للعربة. كلما كبر الفرق بينهما
 كلما لزمنا دوران أكبر و تغيير أكبر في اتجاه العربة و بالتالي كلفة أكبر .

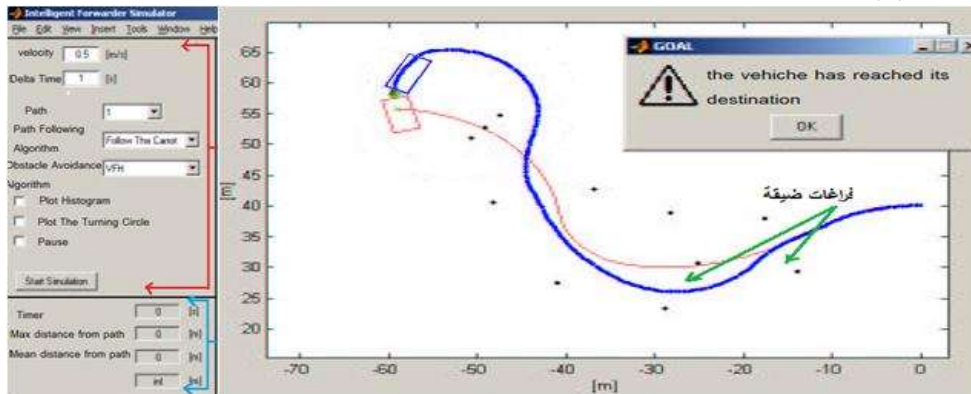
3-يمثل الحد الثالث كلفة المرور في الاتجاه المرشح بمقارنته مع اتجاه الحركة و توجيه الحركة في القطاع
 السابق، كلما كبر الفرق بين الاتجاهين كلما كبرت الكلفة. يسمى الاتجاه المرشح المختار (رقم القطاع المرشح لمرور
 العربة عبره) و الموافق لأقل قيمة لتابع الكلفة g بما يلي: (C_{sel}) و تعطى زاوية التوجيه الموافقة له (ψ) بالعلاقة:

$$\psi = c_{sel} * \alpha \dots \dots \dots (19)$$

النتائج والمناقشة:

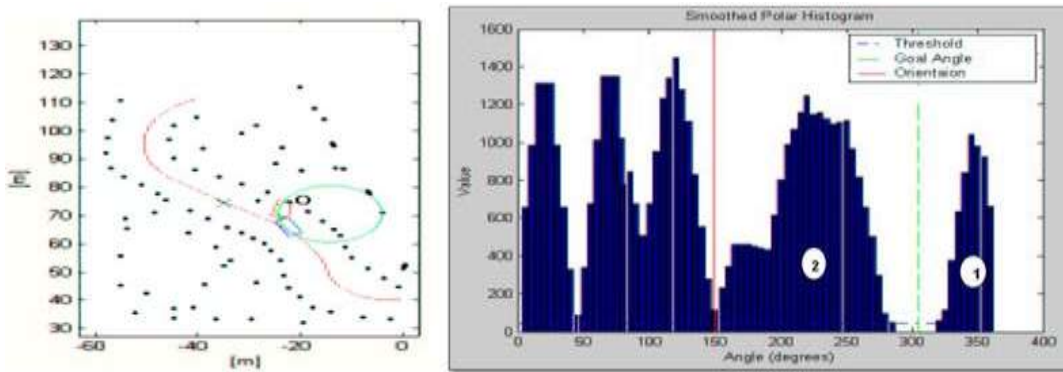
قمنا ببناء محاكي لعربة روبوتية باستخدام برنامج التحليل الإحصائي (MATLAB). يظهر في المحاكي كما
 يظهر في الشكل (8) نافذة تبين بيئة العربة حيث يمثل المحوران X,Y أبعاد هذه المنطقة، و يمثل الخط الفاتح الرفيع
 المسار المدروس و المحدد مسبقاً و الذي ينبغي على العربة أن تسلكه وصولاً إلى النقطة الهدف و تمثل النقاط
 الموضحة على جانبي المسار و ضمن البيئة العوائق التي قد تصادفها العربة، بينما يمثل الخط الغامق العريض مسار
 حركة العربة الفعلي الناتج عن ملاحقة المسار و تجنب العوائق. و تمثل العربة بمستطيلين بينهما وصلة تمثل بدائرة
 مصمتة. المنطقة اليسرى في الشكل هي المنطقة التي يتم فيها التحكم بكل إعدادات المحاكاة: السرعة، الخطوة الزمنية،
 اختيار المسار. عندما قمنا بتطبيق خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي (VFH)، حصلنا على الهيستوغرام القطبي و

قد تبين أن خوارزمية VFH تسمح للعبية بالمرور عبر فراغات ضيقة بين العوائق القريبة من بعضها البعض كما يظهر في الشكل (8).



الشكل(8) طريقة VFH جيدة من أجل الفراغات الضيقة بين العوائق

هذا و قد أظهرت هذه الدراسة سيئات خوارزمية (VFH) و أنها لا تأخذ حركية العربة بعين الاعتبار، مما قد يؤدي إلى اصطدام العربة بالعوائق أثناء دورانها. حيث نلاحظ على الهيستوغرام القطبي في الشكل (9-a) وجود كتلتين مظلتين (1) و (2) تسيران على أنهما قطاعات محجوزة تغلق الاتجاهات أمام العربة، عندها يتوجب على العربة الدوران كي تسلك في الفراغ الكائن بينهما لأنها دخلت مسبقاً في هذا الفراغ الضيق، مما يؤدي إلى اصطدامها بالعائق (o) (Obstacle o). كما يظهر في الشكل (9-b) لاحظ اصطدامها.



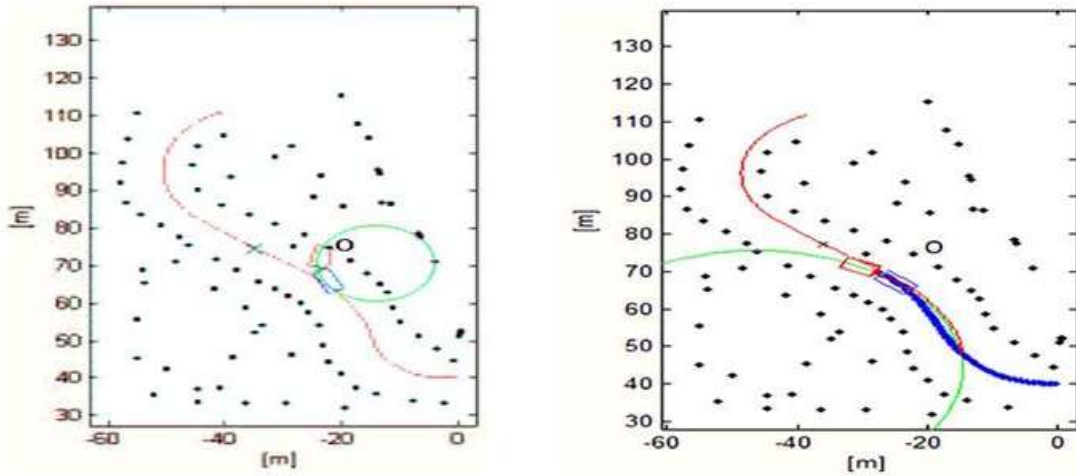
(9-b) اصطدام العربة بالعائق (O)

(9-a) الهيستوغرام القطبي وفق طريقة VFH

الشكل(9) لا تأخذ خوارزمية VFH حركية العربة بعين الاعتبار

ولأخذ مشكلة اصطدام العربة بالعائق عند دورانها (حركية العربة) لجأنا الى خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي المطورة (VFH+) حيث تم تطبيق جميع مراحل هذه الخوارزمية و حصلنا على الهيستوغرامات القطبية: الأساسي و الإثنائي و المقنع. فتم بذلك أخذ حركية العربة بعين الاعتبار لمنع اصطدامها عند دورانها. في الشكل (10) مقارنة بين طريقة (VFH) و طريقة (VFH+) المطبقتين من أجل نفس العوائق على المسار، و نفس البارامترات المدخلة في كلتا الخوارزميتين. نلاحظ من الشكل (10-a) أن طريقة (VFH+) تؤدي إلى وصول أكثر أماناً دون الاصطدام حيث يظهر مرور العربة بين العوائق و تكون دائرة دورانها(الممثلة على الشكل (10-a)) بحيث تتحرك

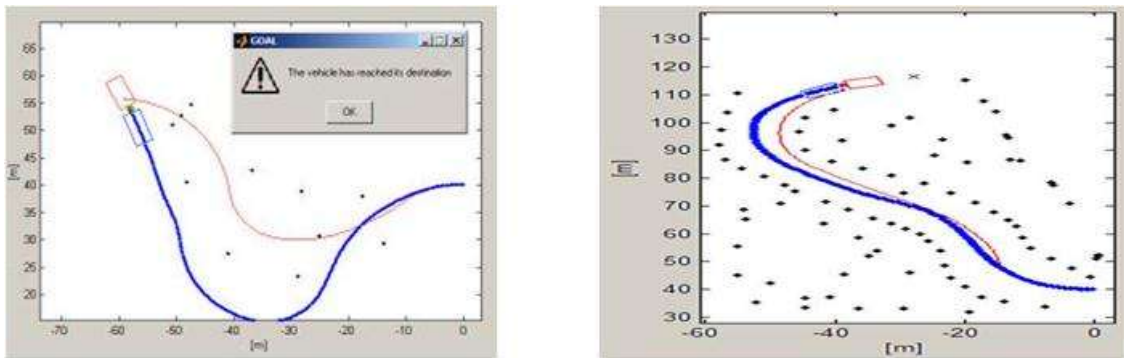
متبعدة عن تلك العوائق. بينما يظهر الشكل (10-b) حالة الاصطدام بالعائق (O) بعد تطبيق خوارزمية (VFH) نتيجة لدورانها وفقاً لدائرة الدوران الموضحة بالشكل (10-b).



(10-a) تجاوز العربة للعوائق دون الاصطدام بها باستخدام (VFH+) (10-b) اصطدام العربة بالعوائق باستخدام (VFH)

الشكل (10) مقارنة بين أداء خوارزميتي VFH+ و VFH من حيث تجاوز العوائق و أخذ حركية العربة بعين الاعتبار

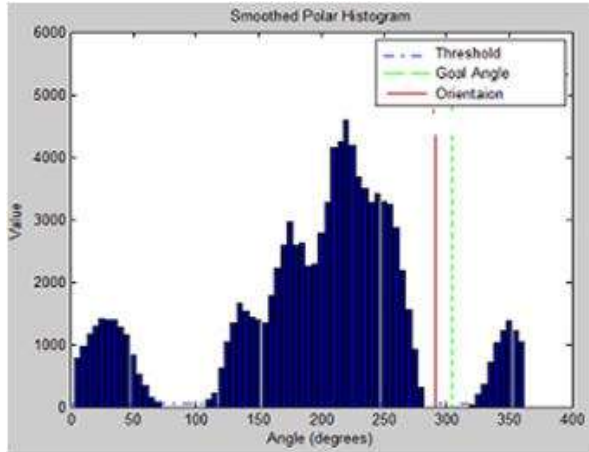
إن حالة الوصول الآمن للعربة بدون الاصطدام بالعوائق كما في الشكل (11-a) هي من إيجابيات طريقة (VFH+). إلا أنه في بعض الحالات قد يؤدي توزع العوائق إلى النفاذ العربة حولها مما يؤدي إلى سلوك مسارات أطول كما يوضح الشكل (11-b).



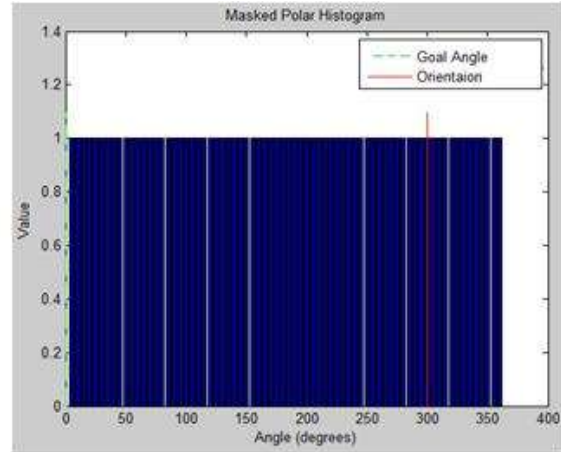
(11-a) وصول آمن للعربة إلى الهدف باستخدام (VFH+) (11-b) وصول آمن باستخدام VFH+ ولكن مع مسارات طويلة

الشكل (11) تعطي VFH+ وصولاً آمناً إلى الهدف ولكن قد تؤدي إلى سلوك مسارات أطول

و بالإضافة إلى أن العربة تسلك مساراً أطول في طريقة VFH+ هناك سلبية أخرى من حيث أن VFH+ قد تعطي أحياناً رسائل خطأ كاذبة توقف العربة، بالوقت الذي يمكن للعربة المرور بين العوائق و الوصول للهدف باستخدام خوارزمية VFH. و يظهر ذلك في الشكلين (12) و (13) بحيث يبين الشكلين (12-a) و (12-b) الهيستوغرامات القطبية لخوارزميتي VFH+ و VFH على الترتيب عند نفس اللحظة التي توقف فيها VFH+ العربة و تعطي رسالة الخطأ. و نلاحظ في الهيستوغرام المقنع لخوارزمية VFH+ وجود كتلة تحجز كامل القطاعات أمام حركة العربة، مما يؤدي إلى ظهور رسالة خطأ و توقف العربة كما في الشكل (13-a). بينما يسمح هيستوغرام VFH بمرور العربة بين العوائق وصولاً إلى الهدف عند دراسة نفس البيئة و نفس البارامترات كما في الشكل (13-b).

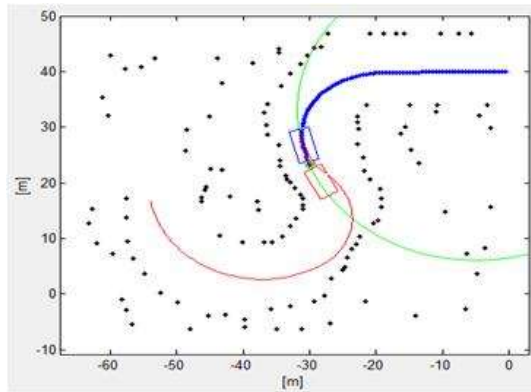


(12-b) الهيستوغرام القطبي لخوارزمية VFH

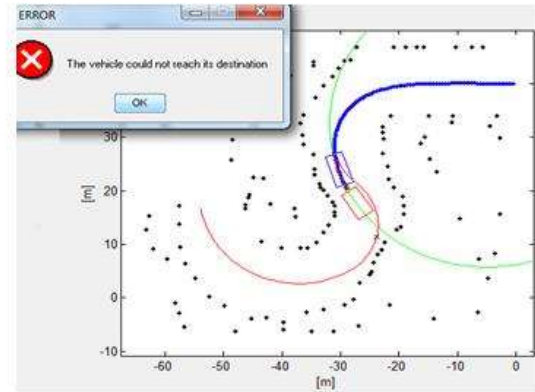


(12-a) الهيستوغرام المقنع لخوارزمية VFH+

الشكل (12) الهيستوغرامات القطبية لخوارزميتي VFH+ و VFH عند نفس المكان الذي ترسل فيه خوارزمية VFH+ رسالة خطأ و توقف العربة



(13-a) إيقاف العربة وظهور رسالة خطأ باستخدام خوارزمية VFH+ تتابع العربة حركتها وفقاً لخوارزمية VFH



(13) ترسل خوارزمية VFH+ رسالة خطأ و توقف العربة في حين تمر العربة وفقاً ل VFH بين العوائق وصولاً للهدف

وقد وجدنا بالنتيجة أنه من أجل نفس البيئة المحيطة بالعربة و نفس البارامترات المدخلة في كلتا الخوارزميتين أن طريقة (VFH+) تضمن وصولاً أكثر أمناً للعربة على مسارها بدون الاصطدام بالعوائق.

تمتاز خوارزمية هيستوغرام الحقل الشعاعي VFH [1] ببساطتها في التطبيق. و تتميز أيضاً هذه الخوارزمية بأنها تمكن العربة من المرور بين العوائق ضمن مسافات و فراغات ضيقة، إلا أن خوارزمية VFH لا تأخذ أبعاد العربة (عرض العربة) بعين الاعتبار فعند توجيه عربة روبوتية على هيئة شاحنة كبيرة مثلاً إلى ممر ضيق قد يؤدي إلى اصطدام طرف العربة بالعوائق بسبب كبر عرضها عند محاولة العربة سلوك ذلك الممر و ذلك بسبب عدم أخذ عرض العربة بعين الاعتبار. كما أن خوارزمية VFH لا تأخذ حركية العربة بعين الاعتبار و تعتبر بأن العربة تستطيع أن تتحرك بأي اتجاه و في أي لحظة، و إذا كان ذلك مقبولاً بالنسبة للروبوتات الصغيرة فإنه ليس دائماً كذلك بالنسبة للشاحنات الكبيرة أو المتمفصلة التي تحتاج لحيز كبير لتدور فيه. تقترح خوارزمية VFH عودة العربة من حيث أنت عندما تتحسس عدم وجود ممر أمامها أو أنها تختار طريق يقتضي أن تقوم العربة بعملية دوران كي تسلك عبره. و تكمن سلبية هذه العملية في إمكانية اصطدام الجزء الخلفي للعربة بالعوائق أثناء الدوران. لقد تم التغلب على كل المشاكل السابقة بما فيها أبعاد العربة (عرض العربة) و حركيتها (دورانها) باستخدام خوارزمية هيستوغرام الحقل

الشعاعي المطورة (VFH+) Vector Field Histogram Plus و التي من أهم إيجابياتها أنها أكثر أماناً من طريقة VFH من حيث الاصطدام بالعوائق لأنها أخذت أبعاد و حركية العربة بعين الاعتبار .
 فعموماً هذه الخوارزمية تجعل العربة لا تمر في الفراغات الضيقة، و بالتالي تتجنب الاستعصاء في مثل هذه الممرات. أما سلبياتها فهي: ميل العربة إلى عدم المرور بين الفراغات الضيقة وفق هذه الخوارزمية قد يجعلها تسلك مسارات أطول. أيضاً قد تؤدي (VFH+) إلى فشل كاذب بالوصول إلى الهدف حيث تظهر رسالة خطأ و تتوقف حركة العربة بالوقت الذي تتمكن فيه خوارزمية VFH من الوصول إلى الهدف.

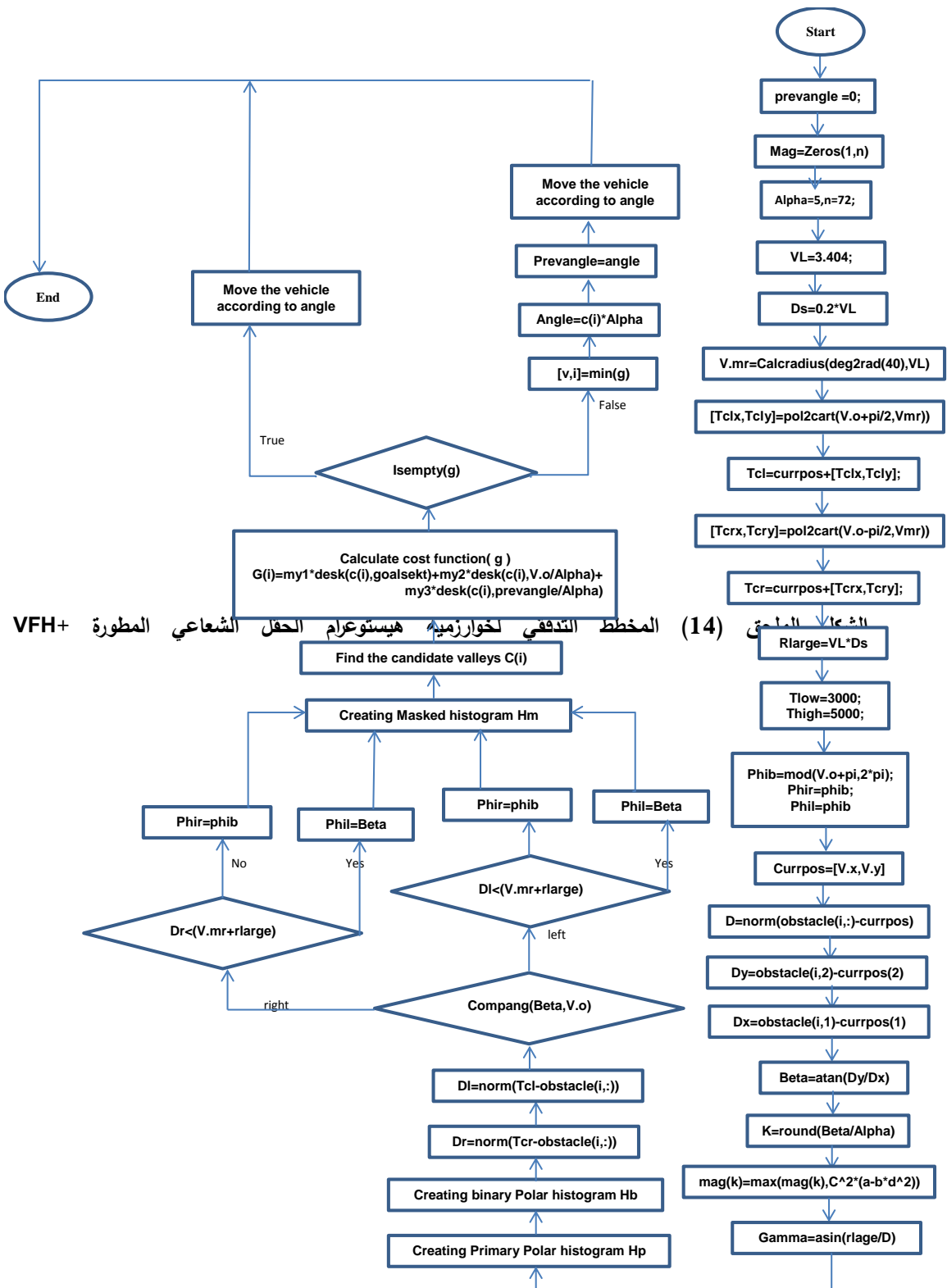
الاستنتاجات والتوصيات:

- يعاني المحاكى المنفذ في البحث بعض المشاكل التي يمكن التخلص منها في الدراسات اللاحقة و منها:
 • يمكن للعربة في المحاكى أن تدور وفق زوايا دوران أعظمية هي $(+40^\circ)$ إلى (-40°) عند خطوة زمنية واحدة. أما في الواقع فتعتمد زاوية الدوران على سرعة حركة العربة إلى الأمام، و على طول فترة الخطوة الزمنية (Δt)، حيث أن العربة قد لا تكون قادرة أحياناً على الدوران بعيداً عن العائق بالسرعة الكافية. و هي مشكلة يمكن التغلب عليها من خلال ضبط معاملات خوارزمية تجنب العوائق.
- افترضنا في البحث أن الوصلة (النقطة المركزية للعربة (Vehicle Center Point (VCP) تبقى ثابتة. أما في الواقع فتتحرك الوصلة في الشاحنة المتمفصلة الحقيقية مثل بقية أجزاء العربة. و يتحدد الجزء الأكثر حركة بالاعتماد على حمولة الشاحنة. يمكن في أبحاث لاحقة مراعاة شروط الحركة تلك.
- لم يتم في البحث أخذ تأثير الضجيج على تحديد موقع العربة. فإذا كانت العربة تحصل على موقعها من أنظمة التحديد الجغرافية (GPS)(Global Positioning System) و كان هناك ضجيج، هذا يعني أن الموقع الذي تقرأه العربة قد لا يكون الموقع الحقيقي بالتالي سنعطى الخوارزميات معلومات خاطئة. من المهم في المستقبل دراسة تأثير ذلك على تجنب العوائق.
- إن الخوارزميات المقترحة تم برمجتها بلغة (MATLAB) وفقاً للمخطط النهجي المبين في الشكل الملحق (14) تم اختيار الثوابت : بحيث تكون الزوايا الابتدائية لانطلاق العربة $\text{prevangle}=0$ على إعتبار أن الزوايا بين الجزء الأمامي و الجزء الخلفي للعربة $=0$ ، و بالتالي زاوية توجيهه بدائية صفرية. تم في البرنامج أخذ مصفوفة صفرية تمثل مطالات أشعة القوى الجاذبة و النابذة تم ملئها فيما بعد بمطالات القوى النابذة و الجاذبة التي جرى حسابها. كما و تم تحديد الثوابت $\alpha=5$ و هي تمثل الدقة الزاوية و كلما صغرت قيمة الدقة الزاوية كلما كانت الدراسة أدق و لكن أبطأ و أصعب لذلك من خلال الدراسة وجد أن الدقة الزاوية $\alpha=5$ كافية حيث تم تقسيم شبكة الهيستوغرام الى $n=72$ قطاع. تم في المخطط البحث افتراض أن طول العربة المدروسة $VL=3.404$ و هو يمثل المسافة من النقطة المركزية للعربة الى منتصف الجزء الأمامي أو الخلفي للعربة و يتم أخذ قيمته من لوحة بيانات العربة datasheet التي تعبر عن خصائص العربة. تم في البرنامج اعتبار أن أصغر مسافة بين العربة و العائق هي DS و تتعلق بطول العربة و هي أصغر مسافة يمكن للعربة أن تقترب بها من العائق قبل أن يتوجب عليها الدوران مبتعدة عنه.
- تعبر $C(i)$ عن الاتجاه المرشح لمرور العربة من خلاله حيث تعبر i عن رقم القطاع الموافق لذلك الاتجاه المرشح. عيرنا عن العوائق التي قد تصادف العربة بمصفوفة أسميناها $\text{Obstacle}(i,:)$ حيث $\text{Obstacle}(i,:)$ مصفوفة

تعبّر عن العوائق الموجودة على السطر a من الشبكة الهيستوغرامية أي أن a تعبّر عن رقم السطر في حين أن z تعبّر عن رقم العمود ضمن تلك الشبكة)، لكن يمكن استخدام أي لغة أخرى من لغات البرمجة المتداولة.

المراجع:

- [1] KOREN, Y; BORENSTEN, J. *Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation*. Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Autonomous, 1998.
- [2] ULRICH, I ; BORENSTEIN, J. *VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots*. IEEE Int. Conf. on Robotics and Autonomous, page 1572-1577, May 2001.
- [3] HELLSTORM, T. *Autonomous Navigation for Forest Machines*. Pre-study, University of Umea, aug 2000
- [4] RINGDAHL, O. *Path Tracking and Obstacle Avoidance Algorithms for Autonomous Forest Machines*, Department of Computing Science, University of Umea, 2003.
- [5] WALLACE, R; STENTZ, A; THORPE, C; WHITTAKER, L. *First Results in Robot Road-Following*. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2005.
- [6] Mathew, J. Barton. *Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle*. Undergraduate thesis, University of Sydney, November, 2008.



الشكل الملحق (14) المخطط التدفقي لخوارزمية هيسنوغرام الحقل الشعاعي المطورة VFH+