

Internet Electronic Journal Nanociencia et Moletrónica

Diciembre 2003, Vol. 1; N°2, págs. 120-133

Aplicación del algoritmo de búsqueda por amplitud en un espacio finito utilizando cámara y sensores de acercamiento a un robot con recursos limitados

M. M. Bustillo¹, E. Coraza¹, A. Campeche¹, A. Zehe², J. I. Cortez¹

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Laboratorio de Arquitectura de Computadoras

¹ Facultad de Ciencias de la Computación

² Facultad de Ciencias de la Electrónica

14 sur y avenida San Claudio

Tel.: (01)(222) 229-55-00 Ext. 7217

e-mail: bustillo@solarium.cs.buap.mx

recibido: Noviembre 12, 2003

revisado: Diciembre 8, 2003

publicado: Diciembre 16, 2003

Citation of the article:

M. M. Bustillo¹, E. Coraza¹, A. Campeche¹, A. Zehe², J. I. Cortez¹, “Aplicación del algoritmo de búsqueda por amplitud en un espacio finito utilizando cámara y sensores de acercamiento a un robot con recursos limitados”, Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2003, 1(2), 120-133:

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

Aplicación del algoritmo de búsqueda por amplitud en un espacio finito utilizando cámara y sensores de acercamiento a un robot con recursos limitados

M. M. Bustillo¹, E. Coraza¹, A. Campeche¹, A. Zehe², J. I. Cortez¹

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Laboratorio de Arquitectura de Computadoras

¹Facultad de Ciencias de la Computación, ²Facultad de Ciencias de la Electrónica

14 sur y avenida San Claudio Tel.: (01)(222) 229-55-00 Ext. 7217

e-mail: bustillo@solarium.cs.buap.mx

recibido: Noviembre 12, 2003

revisado: Diciembre 8, 2003

publicado: Diciembre 16, 2003

Internet Electron. J. Nanocs. Moletrón. 2003, 1(2), pags. 120-133

Resumen

En este trabajo se trata el problema de localización de tres objetos en una cancha de fútbol, que son: la pelota, portería local y la portería contrincante. Contamos con un robot rodante que tiene una cámara, dos encoders uno para cada rueda y tres sensores infrarrojos medidores de distancia. El sistema de control consta de un microprocesador M68332, la capacidad de memoria de los programas es limitada por el cual se examinan algoritmos de búsqueda eficientes y bajos requerimientos de procesamiento. Se encuentra la trayectoria entre el robot y la pelota, posteriormente entre la pelota y la meta final. La localización de la pelota y de la meta son desconocidas para el robot. El punto de partida del robot para la búsqueda, es el centro de la cancha. El robot hace un barrido con la cámara del espacio de trabajo para encontrar los objetos. Se utilizan el algoritmo de búsqueda por amplitud con modificaciones.

1 Introducción

En la robótica pueden ser utilizados diversidad de algoritmos que se eligen y aplican de acuerdo a la tarea que debe realizar el robot y de las características de éste. En nuestro trabajo el problema es la localización de objetos en un espacio conocido. Se hace uso de algoritmos de búsqueda. En este documento se trata de la aplicación del algoritmo en un robot rodante con escasos recursos de almacenamiento de programas y procesamiento de datos. Cuenta con dispositivos externos con los que obtiene información del espacio de trabajo. El espacio de trabajo es un cancha de fútbol. Se tiene tres objetivos a localizar: la pelota de color naranja, la portería local pintada de color azul y la portería contraria pintada de color verde. Se realiza procesamiento de imágenes para el reconocimiento de figuras. Se aplican técnicas de estimación de bordes y filtros para el reconocimiento de objetos por medio del color [1], se utilizan algoritmos de búsqueda que tienen aplicaciones en cualquier problema de búsqueda en espacio de estados por ejemplo en optimización de rutas aéreas. El algoritmo aplicado en este trabajo fue modificado para ser implantado. Los algoritmos de optimización son necesarios para determinar las distancia óptimas [2], cuando el objeto es localizado. El robot puede ser colocado en cualquier parte de la cancha y este es capaz de obtener información de su entorno para iniciar la búsqueda, éste realiza movimientos hacia la posición inicial: el centro de la cancha y después se posiciona en dirección hacia la portería contraria.

La modificación del algoritmo de búsqueda por amplitud se hace considerando que el robot cuenta con dispositivos externos de los cuales se obtiene información adicional que permite generar el árbol con el número de nodos acotada por el espacio de trabajo, el alcance de los sensores y la distancia focal de la cámara. Antes que el robot se posicione en el punto de inicio de la búsqueda, con los dispositivos percepción del medio, se verifica en que posición se encuentra, para que en caso de estar en alguna esquina o en alguna posición donde los muros le impidan girar, realice movimientos que le permitan salir hasta una posición en la que tenga mayor libertad de movimiento. Posteriormente con la cámara realiza una búsqueda de la pelota en el área circundante al robot. Si esta es encontrada, se realiza el cálculo de la distancia que tiene que recorrer para estar en posición de patear la pelota, de otra manera se genera un nodo raíz en el punto de inicio de la búsqueda; expandiéndolo y generando cinco nodos descendientes. Este proceso se hace en cuatro puntos separados por ángulos de 90°, deteniéndose cuando se localiza la pelota. De la posición de inicio de búsqueda realiza un desplazamiento igual a la mitad del alcance focal de la cámara, en dirección del nodo central, reproduciendo el procedimiento anterior. Cuando se encuentra la pelota se calcula la distancia entre dos puntos. Estos puntos son las coordenadas de la posición del robot al momento de localizar la pelota y las coordenadas de la posición de la pelota en el espacio de trabajo [3,4].

2 Desarrollo

La descripción de las etapas de desarrollo que son: los recursos del robot, descripción del espacio de trabajo, función de la cámara en la búsqueda y el análisis del algoritmo de búsqueda por amplitud y la modificación que se realizó para la solución de nuestro problema.

2.1 Descripción de los recursos del robot

Se utiliza el robot Eyesoccer, es un robot móvil rodante. El robot dispone de sensores y actuadores para que pueda moverse en el entorno, estos son: tres sensores infrarrojos, una cámara digital, dos motores que permiten el movimiento del robot, dos encoders, uno en cada motor y dos servos, uno para mover la cámara y el otro para el pateador. El hardware está compuesto por un sistema *eyebot*, con un microcontrolador Motorola 68332, 512 kb de Flash-ROM y memoria RAM de 1 MB, además cuenta con un módulo de radio para comunicarse con otros robots y para comunicarse con la PC., cuenta con un LDC (Liquid Display Cristal) que permite la interacción del usuario con el programa. Adicionalmente lleva incluido un micrófono [5]. En la figura 1 se observa el robot eyesoccer..



Fig. 1 Vista lateral del eyesoccer

2.2 Descripción del espacio de trabajo del robot.

El espacio de trabajo es una cancha de fútbol con medidas 1.20 m de ancho y 2.10 m de largo, la cancha esta delimitada por muros que utiliza el robot por medio de los sensores como apoyo para no salir del espacio de trabajo. Las porterías están definidas por colores, la portería del contrincante es de color verde y la portería local es de color azul que están colocadas en la parte central de los extremos, como se muestra en la figura 2a). En la figura 2 b) se muestra el robot con la posición de la cámara y sus sensores.

Definición: El entorno de trabajo en el cual un robot móvil realizara su tarea, es el conjunto de configuraciones [2] en las cuales puede encontrarse el robot en un determinado instante de tiempo. Se define una configuración q de un robot como un vector cuyas componentes proporcionan información completa sobre el estado actual del mismo. Un robot es un sistema rígido al cual se le puede asociar un sistema de coordenadas móvil.

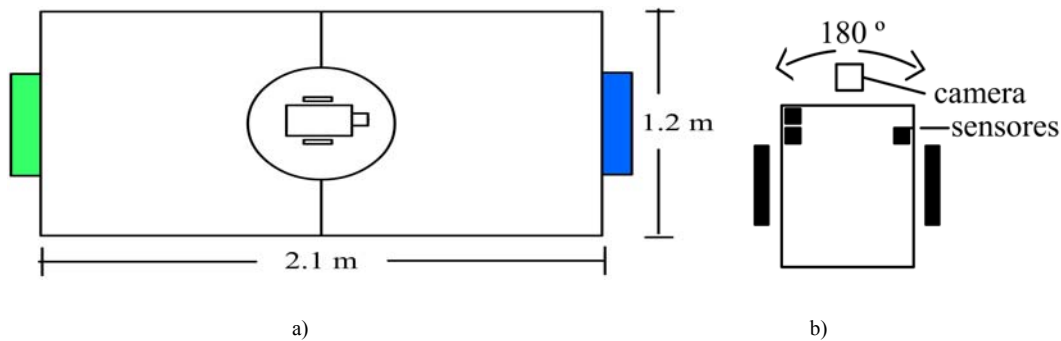


Fig. 2. a). Espacio de trabajo del robot eyesoccer. b) La posición de los sensores y la cámara del robot eyesoccer

El vector que proporciona información sobre el estado actual del robot viene dado, en principio por componentes: la posición p y la orientación θ [6], por tanto se puede definir configuración como:

$$q = (p, \theta) = (x, y, \theta) \quad (1)$$

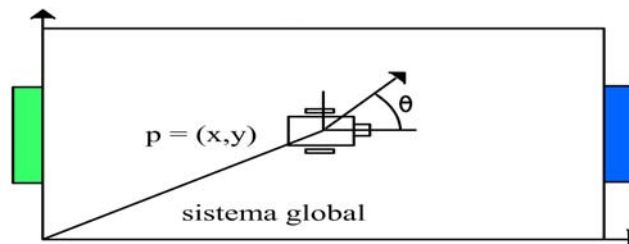


Fig. 3. Sistema global y local de coordenadas asociada al robot

2.3 Diseño del algoritmo.

El algoritmo de búsqueda en amplitud es un procedimiento de control en el que se revisan todas las trayectorias de una determinada longitud antes de crear una trayectoria más larga[7]. Sus características son las siguientes:

- Los nodos se expanden por orden no decreciente de profundidad.
- Se implementa usando una estructura de cola para la lista de nodos.
- Suponiendo un factor de ramificación r y un camino hasta la solución de profundidad p por el número de nodos expandidos en el peor de los casos es: $r^0 + r + r^2 + \dots + r^p$
- Complejidad en tiempo y espacio: $O(r)^p$

Su procedimiento es el siguiente:

Crea una agenda de un elemento (el nodo raíz)
hasta que la agenda este vacía o se alcance la meta
si el primer elemento es la meta
entonces acaba
si no elimina el primer elemento y
añade sus sucesores al *final* de la agenda

El algoritmo modificado para la solución de nuestro problema de búsqueda es el siguiente:

Poner el robot en cualquier posición de la cancha
Realizar búsqueda inicial
Si encuentra pelota, termina realizando tiro
Si no ir al centro
Realizar búsqueda por amplitud
Si encuentra pelota, termina realizando tiro
Si no termina misión.

Definición de las variables

PL = Portería local, PC = Portería contraria, CA = Cámara, S1 = Sensor derecho, S2 = Sensor frontal, S3 = Sensor izquierdo, D = longitud del robot = 13cm, EN= encoders.

BÚSQUEDA INICIAL

Caso 1: Si S1, S2, S3 detectan muro, el robot realiza movimiento de retroceso hasta que $S2 \geq D$

Si CA detecta pelota, realizar tiro

Si no, CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota, realizar tiro

Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3 y CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta se que sean 180°

Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3 y CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota, realiza tiro

Si no, ir al centro

Caso 2: Si S1 y S2 detectan muro, robot realiza movimiento en reversa en forma elipsoidal hasta que $S2 \geq 2D$

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota, realizar tiro

Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota, realizar tiro

Si no, ir al centro

Caso 3: Si S2 y S3 detectan muro, robot realiza movimiento en reversa de forma elipsoidal hasta que $S2 \geq 2D$

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota, realizar tiro

Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S1

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°

Si CA detecta pelota, entonces realizar tiro

Si no, ir al centro

Caso 4: Si $S2 \geq 3D$ y S3 detecta muro cercano, robot realiza avance de forma elipsoidal hasta que $S2 \leq D$ $S3 \leq D$

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota entonces realizar tiro

Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S1

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°

Si CA detecta pelota, realiza tiro

Si no, ira al centro

Caso 5: Si $S2 \geq 3D$ y S1 detecta muro cercano, robot realiza avance de forma elipsoidal hasta que $S2 \leq D$ o $S1 \leq D$

CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sean 180°

Si CA detecta pelota entonces realizar tiro
Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3
CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°
Si CA detecta pelota, realiza tiro
Si no, ir al centro

Caso 6: Si $S2 < D$ y $S3 > D$, robot realiza retroceso hasta que $S2 > D$
CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°
Si CA detecta pelota, entonces realizar tiro
Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3
CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°
Si CA detecta pelota, realiza tiro
Si no, ira al centro

Caso 7: Si S2 fuera de rango y $S1 > D$ y $S2 > D$
CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°
Si CA detecta pelota, entonces realizar tiro
Si no, robot realiza avance hasta que $EN = D$
Si CA detecta pelota, entonces realizar tiro
Si no, robot realiza giro de 90° en sentido de S3
CA realiza búsqueda de pelota haciendo movimientos de 45° hasta que sea 180°
Si CA detecta pelota, realiza tiro
Si no, ira al centro

REALIZAR TIRO

Avanza hacia la pelota
S2 mide distancia entre pelota y robot
CA realiza búsqueda de portería que este en la misma dirección de la pelota hasta que $S2 = D$ y vea portería.

Caso 1: Si CA detecta PL y giro al final de la búsqueda esta entre 91° y 180°,
Utiliza D como radio de una circunferencia para girar el robot hacia la derecha hasta que la dirección de PL sea contraria patear pelota

Caso 2: Si CA detecta PL y giro al final de la búsqueda esta entre 181° y 269°
Utiliza D como radio de una circunferencia para girar el robot hacia la izquierda hasta que la dirección de PL sea contraria patear pelota

Caso 3: Si CA detecta PC y giro al final de la búsqueda esta entre 0° y 90°

Utiliza D como radio de una circunferencia para girar el robot hacia la izquierda en dirección de la PC hasta que CA detecte la PC y la pelota en el mismo lugar patear pelota

Caso 4: Si CA detecta PC y giro al final de búsqueda esta entre 270° y 359°

Utiliza D como radio de una circunferencia para girar el robot hacia la derecha en dirección de la PC hasta que CA detecte la PC y la pelota en el mismo lugar patear pelota

IR AL CENTRO

Caso 1: Si CA detecta PC o PL y $S2 \leq S3$, robot realiza desplazamiento en esa dirección hasta que $S2 = D$

Si $S1 = S3$, robot realiza giro de 180° en sentido de $S3$ y realiza desplazamiento en esa dirección hasta que $S2 = 950$ mm

Si no, CA realiza búsqueda del centro de la cancha pintado de color negro y realiza desplazamiento en esa dirección hasta que $S2 = 950$ y $S1 = S3$

Si no, CA realiza búsqueda de la portería mas cercana y hace desplazamiento hasta que $S2 = D$.

2.4 Implementación

El algoritmo de búsqueda por amplitud se modifica en dependencia del uso de la cámara digital como sigue:

Por medio de la cámara digital identificamos los objetivos, efectúa un censado en cada uno de los nodos generados por el algoritmo como se muestra en la figura 4, obtiene una imagen digital la cual se guarda como matriz y se recorre píxel por píxel para identificar los del color de la pelota y así saber si en ese punto se encuentra ésta. Para obtener los píxeles requeridos, primero se capturan aquellos que están entre los valores que corresponde con el naranja en RGB. Un servomotor es el que se encarga de proporcionar movimiento de tal modo que se posiciona en un nodo generado.

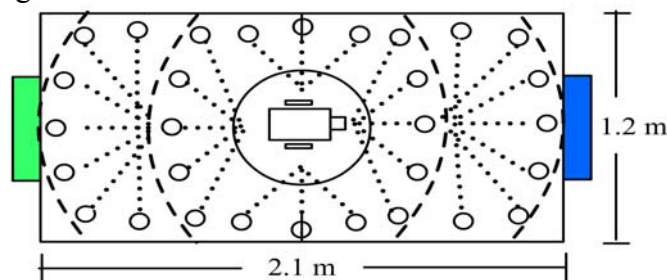


Fig. 4. Espacio de trabajo y los nodos generados por el algoritmo para ser recorridos por la cámara y el robot.

Dependiendo de la información obtenida, el robot realiza 4 movimientos giratorios de 90° en la primera posición, 3 en la siguiente posición y 2 en la última posición para lograr que la cámara visite todos los nodos en el espacio de trabajo, en el peor caso. De otra manera solo realiza los movimientos hasta que localiza la pelota. En la figura 5 se aprecian los movimientos que realiza.

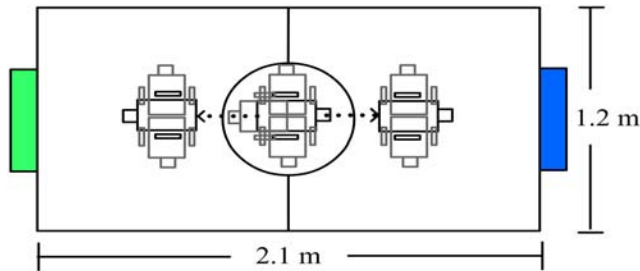


Fig. 5 Movimientos necesarios del robot para poder realizar la búsqueda en todos los nodos generados por el algoritmo.

Ya que se localizó la pelota, si la cámara no esta en posición de inicio, es por que se ha encontrado la pelota en otra posición y para lo cual no se aplica el algoritmo de amplitud, la orientación del robot en un inicio es hacia la portería contraria, entonces se verifica que posición tiene el nodo para que el robot realice un giro hacia esa orientación y así pueda desplazarse hacia la pelota, pero debido a que la cámara solo tiene libertad de movimiento en el eje de coordenadas (x, y) y que esta se encuentra montada sobre la base del robot en la parte frontal como se muestra en la figura 1, lo cual impide que cuando la pelota esta cercana al robot no pueda ser detectada por ésta, entonces calculamos, antes, la distancia existente entre los dos puntos: el robot y la pelota resolviendo la formula para cálculo entre dos puntos en el plano cartesiano[3], [4].

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (2)$$

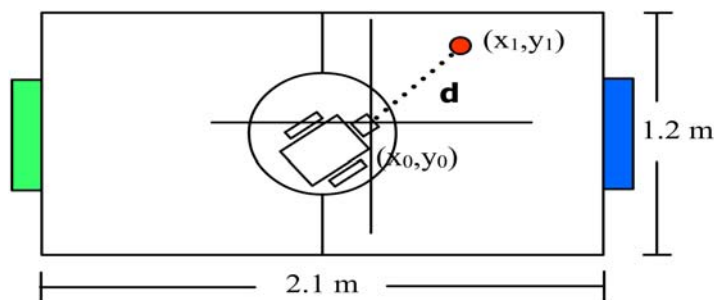


Fig. 6. Las posiciones de los dos puntos en el espacio de trabajo

Los valores de las coordenadas necesarios para realizar el cálculo de la distancia son obtenidos de la posición del robot cuando la cámara localiza la pelota y de la posición donde se localiza la pelota por la cámara. La coordenadas de la posición del robot siempre son (0,0) pues siempre que el robot realice un desplazamiento este cambia de posición se hace una proyección del plano hacia ese punto para tener un sistema local de coordenadas. Los sensores realizan una función muy importante ya que por medio de estos podemos identificar los obstáculos que puedan impedir la búsqueda de la pelota o patear ésta hacia la portería contraria. El robot tiene instalados 3 sensores, uno en la parte frontal, uno en el lado derecho y uno en el lado izquierdo. Dado que el robot puede ser colocado en cualquier parte de la cancha, entonces con la información obtenida de los sensores, se puede saber que problema tiene que resolver y como lo tiene que hacer de tal forma que logre realizar la búsqueda tanto de la pelota como de las porterías. En la figura 7 podemos ver el caso donde se hace uso de los 3 sensores.

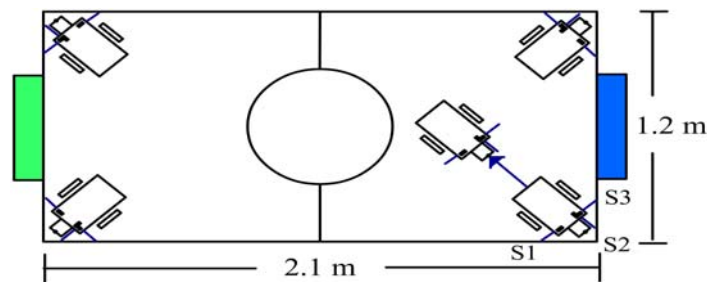


Fig. 7 El robot haciendo uso de los tres sensores para la identificación del caso en el que este se encuentra y el desplazamiento que realiza para poder iniciar la búsqueda de la pelota.

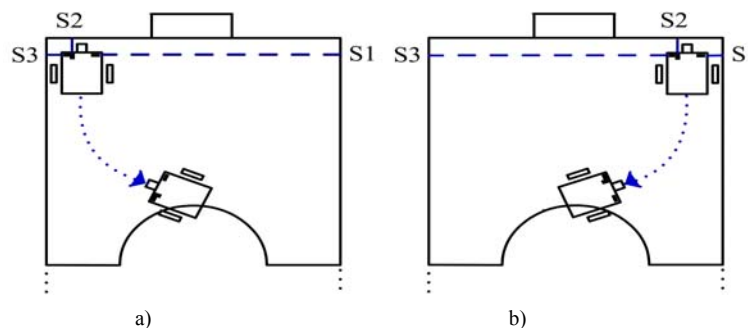


Fig. 8 a), Movimiento que realiza el robot en el caso cuando es colocado con los sensores S3 y S2 cercanos a los muros en una esquina, en b) se aprecia el movimiento que realiza cuando el robot es colocado en una esquina con los sensores S1 y S2 cercanos a los muros.

Estos son los casos donde el robot se coloca en las esquinas de forma paralela a los muros laterales de la cancha, en la figura 8 a), tenemos el caso en que el robot está colocado con los sensores S3 y S2 muy cercano a los muros.

El robot tiene que realizar un desplazamiento en reversa pero en forma elipsoidal en dirección a S1, se detiene hasta que los sensores indiquen una distancia igual a la longitud del robot y así realizar los movimientos requeridos para la hacer la búsqueda inicial. En la figura 8 b) es el caso en que el robot esta colocado con los sensores S1 y S2 muy cercanos a los muros, el robot realiza un desplazamiento en reversa, en forma elipsoidal hacia el lado de S3, se detiene hasta que los sensores indiquen una distancia igual a la longitud del robot para que pueda hacer la búsqueda inicial.

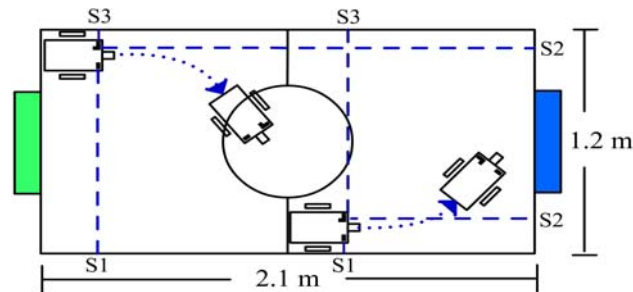


Fig. 9 Movimientos del robot cuando es colocado de forma paralela junto a un muro lateral de la cancha y con S2 a una distancia mayor o igual a tres veces la longitud del robot.

Cuando el robot es colocado de forma paralela y muy cercano a un muro lateral, es decir con S3 muy cercano al muro y S2 que indique una distancia mayor o igual a tres veces la longitud del robot, este realiza un avance en forma elipsoidal y en dirección de S1, se detiene hasta que el sensor S3 indique una distancia igual a la longitud del robot. El otro caso es cuando S1 esta muy cercano al muro y S2 indica una distancia mayor o igual a tres veces la longitud del robot, entonces el robot realiza un avance en forma elipsoidal y en dirección a S3, se detiene cuando S1 indica una distancia igual a la longitud del robot.

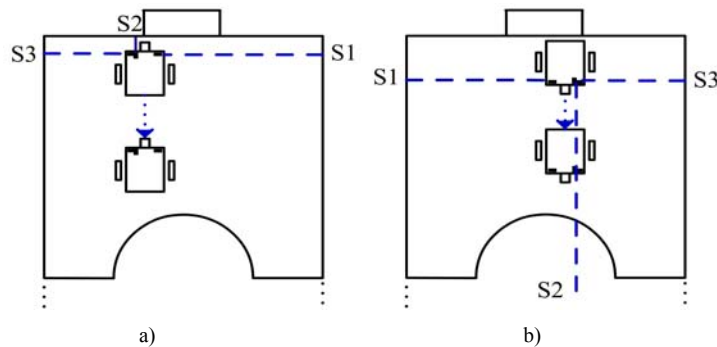


Fig. 10 a) Movimiento que debe realizar el robot cuando es colocado en el área central de la cancha con el sensor S2 cercano a un muro del extremo, b) es el caso cuando el sensor S2 esta en dirección opuesta al caso antes mencionado.

Cuando el robot es colocado en la parte central de los extremos de la cancha, con el sensor S2 cercano a un muro del extremo, el robot realiza un retroceso y se detiene hasta que S2 indique una distancia igual a la longitud del robot para que pueda hacer la búsqueda inicial. Si el robot es colocado como se muestra en la figura 10 derecha, el robot realiza un avance y se detiene hasta que los encoders indiquen que se ha recorrido una distancia igual a la longitud del robot.

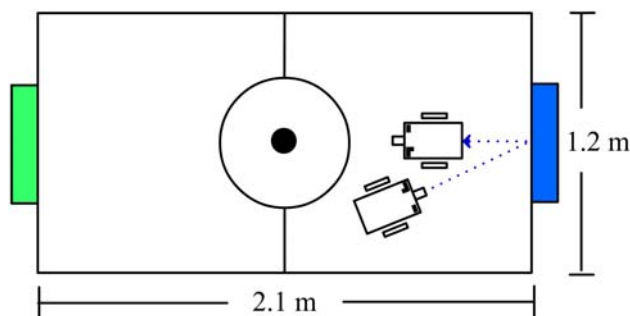


Fig. 11 Movimientos que realiza el robot cuando la cámara no detecto la pelota en la búsqueda inicial, y tiene que dirigirse hacia el centro.

Después de que el robot ha realizado la búsqueda inicial y la cámara y no detecto la pelota con la cámara se realiza una búsqueda de la portería mas cercana, una vez que la localiza, realiza un avance hasta esta en posición frente a la portería, a continuación con la cámara realiza una búsqueda del centro pintado de color negro y realiza un avance en esa dirección, y se detiene hasta que el sensor S2 es igual a 950mm.

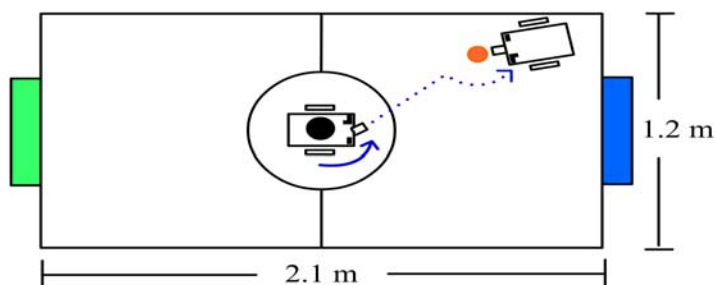


Fig. 12 Movimientos que realiza el robot cuando detecta la pelota en dirección de la portería local del lado izquierdo.

Cuando la cámara detecta la pelota en dirección a la portería local del lado izquierdo, el robot realiza un avance hacia la pelota y se detiene cuando la distancia entre la pelota y el robot es igual a la longitud del robot, a continuación realiza un avance alrededor de la pelota hasta que esta posicionado en dirección a la portería contraria y junto a la pelota para realizar el tiro. Cuando la pelota es detectada por la cámara en dirección a la portería en el lado derecho local, el robot realiza un avance hacia la pelota, pero se detiene cuando la distancia entre el robot y la pelota es igual a la longitud del robot. Posteriormente realiza un avance en dirección del sensor S3 alrededor de la pelota hasta posicionarse detrás de esta de tal manera que pueda patearla.

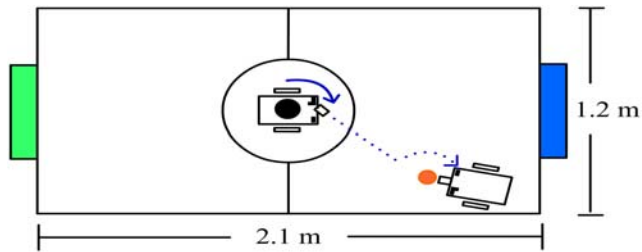


Fig. 13 Movimientos que realiza el robot una vez que ah detectado la pelota en la dirección de la portería local del lado derecho.

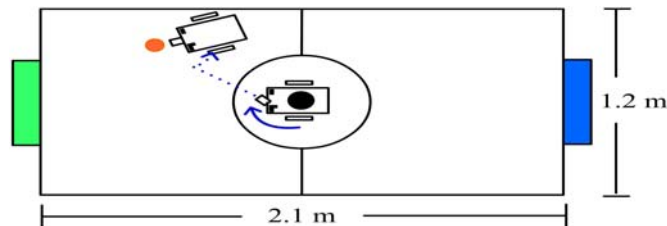


Fig. 14 Movimientos que realiza el robot cuando la cámara localiza la pelota en dirección a la portería contraria en el lado derecho.

Si la cámara detecto la pelota en dirección a la portería contraria, el robot realiza un avance hacia la pelota y se detiene cuando la distancia entre la pelota y el robot es igual a la longitud del robot, posteriormente realiza un avance alrededor de la pelota y se detiene hasta que se posiciona en dirección a la portería contraria, finalmente patea la pelota.

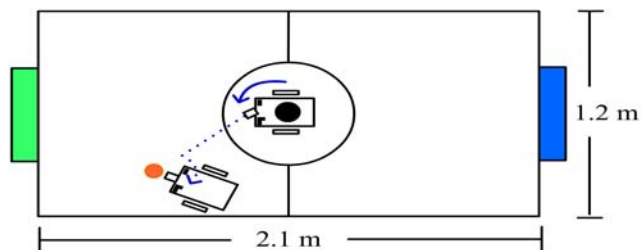


Fig. 15 Movimientos que realiza el robot cuando la cámara ah localizado la pelota en dirección a la portería contraria del lado izquierdo.

Cuando la cámara localiza la pelota en dirección a la portería contraria y del lado izquierdo, el robot realiza un avance hacia la pelota y se detiene cuando la distancia entre la pelota y robot es igual a la longitud del robot, después realiza un avance alrededor de la pelota en dirección al sensor S3 y se detiene cuando se ah posicionado en dirección a la portería contraria y en posición para patear la pelota. Si la pelota es detectada por la cámara en la parte central en dirección a la portería contraria, el robot realiza un avance hacia la pelota y se posiciona junto a la pelota para realizar el tiro. Este es el mejor de los casos. Cuando la pelota es detectada por la cámara en dirección a la portería local en la parte central, el robot realiza un avance hacia la pelota y se detiene cuando la distancia entre el robot y la pelota es igual a la longitud del robot

posteriormente realiza un avance alrededor de la pelota en dirección al sensor S1 y se detiene cuando este posicionado en dirección a la portería contraria y en posición para patear la pelota.

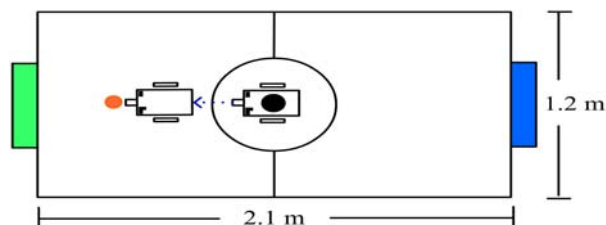


Fig. 16 Movimientos que realiza el robot cuando localiza la pelota en dirección a la portería contraria en la parte central.

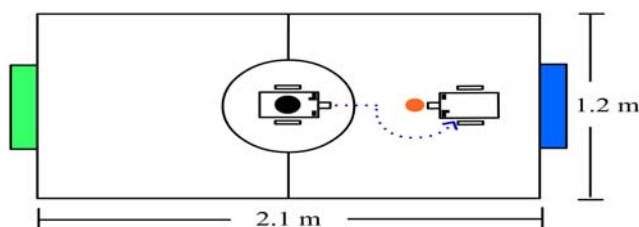


Fig. 17 Movimientos del robot cuando la cámara localiza la pelota en la parte central, pero en dirección a la portería local.

3 Conclusiones

El algoritmo de búsqueda por amplitud modificado aplicado en este trabajo, si satisface el problema de la búsqueda en el espacio de trabajo. Gracias a la distancia focal de la cámara la generación de nodos es menor. El mejor de los casos en la búsqueda de la pelota es cuando la detecta desde el nodo raíz que es el centro, el peor caso es cuando la pelota es detectada en el último nodo del último nivel es decir se generan el máximo de nodos que es 30.

- [1] Rafael C. González, Richard E. Woods, *Tratamiento digital de imágenes*, (USA: Addison-Wesley, 1996).
- [2] Stuart J. Russell, Peter Norving, *Inteligencia Artificial*, (Mexico: Prentice Hall).
- [3] Johann A. Terney, *Calculus and Analytic Geometry*, (USA: Allyn And Bacon, Inc, 1917) 447
- [4] Lehmann, W., *Geometría Analítica*, (México: UTEA, 1978) 11.
- [5] Thomas Bräunl, eyebot, The Univ. of Western Australia, <http://www.ee.uwa.edu.au/~braunl/eyebot/>.
- [6] T Lozano Perez, *Spatial planning: a configuration approach*, Transactions on computers vol. 32, 108-120.
- [7] http://www.terra.es/personal/emmaraff/ApuntesVarios/IntroIA/IA_Tema3.doc
- [8] <http://www.campusvirtual.ece.buap.mx>