

# Localización en RoboCup

Alejandro J Malo Tamayo\*, Felipe de Jesús Khamal Lara Leyva†, Juan Manuel Ibarra Zannatha\*  
& ●MX<sup>0</sup>

\* Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.

† Verstand Labs

**Resumen**— Este artículo pretende describir la evolución de una idea sobre como determinar la localización de un robot en una cancha en la liga de humanoides pequeños (*kidsize*) de RoboCup. Puede parecer pretencioso de nuestra parte no limitarnos a dar el resultado final, pero el artículo tiene como finalidad presentar la evolución de la idea. La localización de un robot, es decir, que el robot determine su posición en la cancha es fundamental en todas las fases del juego. En robótica móvil determinar donde esta el robot en “su mundo” es un problema importante y su conocimiento es punto de partida para que el robot pueda realizar interactuar en él. En muchos casos no se sabe sobre como esta constituido el mundo, entonces el problema se plantea como un problema de localización y mapeo simultáneo (*simultaneous localization and mapping (SLAM)*) donde el robot explora su medio ambiente determinando simultáneamente el mapa y su ubicación en él, un caso extremo es el robot secuestrado (*kidnapped robot*), donde el robot es llevado a un punto arbitrario. Estos problemas han sido resueltos usando métodos basados en estimación teórica, maximización de probabilidades, apareamiento de lecturas de sensores y usando las características cualitativas del medio ambiente. En la RoboCup se conoce el mapa, una cancha de fútbol de dimensiones conocidas con cuatro referencias o *landmarks*: las porterías y un par de postes a los lados de la cancha. Por lo que si el robot conoce su posición en la cancha, el siguiente problema que necesitar resolver, para la toma de decisiones relacionadas con el juego, es el de localizar y seguir objetos en la cancha. A este problema se conoce como DATMO (*detection and tracking of moving objects*). El resultado de este trabajo es un método que usa las referencias para determinar la localización de un robot en la cancha. Punto de partida para hacer DATMO cooperativo, usando triangulación.  
**Palabras clave:** RoboCup, Equipos de Robots

## I. INTRODUCCIÓN

En robótica móvil determinar donde esta el robot en el “mundo” es problema típico y su conocimiento es punto de partida para que el robot pueda realizar otras cosas. En muchos casos existe una ignorancia sobre como esta constituido el mundo, entonces el problema se conoce como SLAM (*simultaneous localization and mapping*) donde el robot explora un medio ambiente “desconocido” determinando simultáneamente el mapa y su ubicación en él, un caso extremo es el problema del robot secuestrado, donde

<sup>0</sup>●MX incluye además, en el orden alfabético de las instituciones que participan, del Cinvestav Manuel Heladio Hunter Sánchez, Eric Hernández Castillo, Jorge Enrique Lavín Delgado, Ángel David Gómez Sánchez, de la UNAM Adalberto Hernández LLarena, Abner Quiroz Clemente, Ignacio López Peña, Lauro Fernando Vázquez Alberto, Héctor Rodrigo Arce González, Eduardo Ruíz Libreros, Marcos Abner, Ramos Ramírez, Ricardo Vargas Morales, Boris Escalante Ramírez

el robot esta en un punto arbitrario del mundo, se podría argumentar que es el caso de un robot caído. Estos problemas han sido formulados usando métodos basados en estimación teórica, maximización de probabilidades, apareamiento de lecturas de sensores y usando las características cualitativas del medio ambiente (Egan, 2010; Pancham *et al.*, 23-25 November 2011; Spero y Jarvis, 2007).

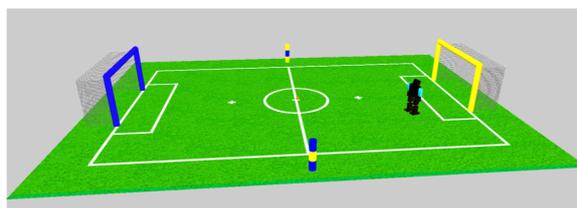


Figura 1. Campo de la liga *kidsize* de la RoboCup

La idea de robots jugando fútbol fue mencionada por primera vez por el profesor Alan Mackworth (University of British Columbia, Canada) en su trabajo “*On Seeing Robots*” (Mackworth, 1993) presentado en la conferencia *Vision Interface’92*. El professor Mackworth veía al fútbol como un campo lo suficientemente difícil como para impulsar la investigación, pero lo suficientemente limitado como para permitir obtener resultados. Su equipo publicó varios trabajos sobre el proyecto que llamaron Dynamo (Barman *et al.*, 1993; Sahota y Mackworth, 1994). Meses más tarde investigadores Japoneses organizaron un taller sobre Grandes Retos en Inteligencia Artificial (October 1992) en Tokyo. Las discusiones concluyeron con el lanzamiento de la *Robot J-League*<sup>1</sup>, una competencia de fútbol entre equipos de robots Esta iniciativa fue abierta a otras naciones, a solicitud de la comunidad internacional ha evolucionado a lo que es hoy la **RoboCup** que desde 1997 se realiza anualmente, este año se realiza en **México**.

En la RoboCup se tiene el mapa, una vista de el es mostrada en la figura 1, es una cancha de fútbol de dimensiones conocidas con cuatro referencias o *landmarks*: las porterías y un par de postes a los lados de la cancha. Por lo que si el robot conoce su posición en la cancha el siguiente problema a resolver es localizar y seguir otros objetos en ella, a este problema se le conoce como DATMO (*detection and tracking of moving objects*). En este trabajo se presenta un método para determinar la localización de un robot en

<sup>1</sup> **J-League** es el hombre de la liga Japonesa de fútbol profesional

la cancha. Lo que permitiría DATMO cooperativo, usando triangulación.

Una restricción de la RoboCup es que los sensores exteroceptivos que pueden equipar un robot deben ser equivalentes a los que posee un ser humano: vista, oído, tacto, olfato y gusto; donde en el caso que nos ocupa la vista, en la forma de una cámara de video de baja resolución, es el sensor usado. El robot tiene la posibilidad de mover la cámara en forma independiente a su cuerpo en acimut y elevación, lo que le permite paliar las limitaciones de la cámara. Otro elemento adicional, que ayuda, es que en el mundo de la RoboCup la paleta de colores esta limitada a naranja, amarillo, azul, cyan, magenta, verde, blanco y grises. El campo es verde con líneas blancas, la bola es naranja con letras negras, una portería es amarilla, la otra es azul, los robots de un equipo tienen marcas cyan, mientras que los del otro magenta, y los robots deben ser oscuros. Las dimensiones de los objetos de la cancha son fijas, las de los robot son variables (RoboCup, 2012). No se tiene control sobre elementos fuera de la cancha dentro del campo de visión del robot, los cuales pueden ayudar o no.

Otra restricción de la RoboCup es que los robots son autónomos, es decir, todo el procesamiento se hace a bordo del robot, los robots son pequeños, los de la categoría *kidsize* no rebasan los 60 cm. Las fuentes de información son los sensores, los otros robots del equipo y el árbitro, estos últimos usando comunicación inalámbrica. Por lo que las computadoras embarcadas son pequeñas; simultáneamente procesan imágenes, toman decisiones sobre el juego y generan el movimiento.

El presente trabajo primero analiza la posición en forma cualitativa, al no lograrse, se refina la idea hasta determinar la posición y una medida del error del mismo usando triangulación a partir de la posición conocida de dos marcas. Ya que no se cuenta con una cancha, se presentan los resultados de un problema equivalente para imágenes con diferentes resoluciones.

## II. ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DEL ROBOT EN LA CANCHA

Los filtros de Kalman o de partículas son usados para estimar la posición y orientación de un robot su desventaja es que son computacionalmente complejos. En este trabajo proponemos usar el conocimiento que se tiene de la cancha y de las referencias fijas en ella.

### II-A. 1<sup>er</sup> Propuesta: Dentro o Fuera de la Cancha

La primera pregunta que un robot se hace es si esta dentro o fuera de la cancha. Los límites de la cancha son definidos por líneas blancas que definen su borde. La bola esta dentro de la cancha si no ha rebasado completamente estas líneas, es posible usar la transformada de Hough o convolución para detectarlas. En este caso evitamos hacerlo y aprovechamos la presencia de puntos de referencia fijos (“landmarks”) existentes en la cancha. El campo tiene cuatro puntos de referencia fijos que pueden ser usados para

determinar la ubicación del robot, éstos pueden verse en la figura 1 y son la portería azul (A), el poste amarillo-azul-amarillo (B), la portería amarilla (C) y el poste azul-amarillo-azul (D).

El orden en que aparecen en el campo de visión del robot podría ser usado para determinar si el robot esta dentro de la cancha. Al girar la cabeza en acimut, siempre los verá en el mismo orden: ABCD, BCDA, CDAB, o DABC. Dadas las características de las cámaras usada, frecuentemente se verá sólo una referencia, por lo que el robot necesitará mover la cabeza para ver otras marcas, en este caso podrá ver AB, BC, CD, DA en el caso de dos referencias contiguas. Si las referencias aparecen en un orden diferente entonces ¡el robot esta fuera de la cancha! Desafortunadamente, existen puntos fuera de la cancha donde las referencias se pueden ver en el mismo orden, las referencias definen “corredores” donde las referencias se ven en el mismo orden que se verían desde el interior de la cancha. ¿Cual es la diferencia? El ángulo subtendido. Cuando un robot esta en el interior de la cancha necesita rotar 360° la cabeza, cuando esta sobre la línea que une dos referencias el ángulo es de 180° y se va haciendo menor conforme nos alejamos del cuadrado imaginario que forman las cuatro referencias. El reglamento restringe el movimiento panorámico y el campo de visión de la cámara a 270° y 180° respectivamente.

Por lo que el orden en que aparecen los objetos en el campo de visión es de utilidad limitada y necesita del ángulo de subtendido.

### II-B. 2<sup>o</sup> Propuesta: Ángulo subtendido

El ángulo subtendido, mostrado en la imagen 2, es el ángulo  $\alpha_1$  que se forma entre dos objetos (A – B) y el observador  $P_1$ , se puede estimar a partir de las características de la cámara y de una o varias imágenes.

Nos preguntamos, que curva forman los puntos que tiene el mismo ángulo subtendido entre dos puntos fijos y el observador. La respuesta la encontramos en un par de teoremas, el Teorema del Ángulo Central y el Teorema de Tales de Mileto. El primero es más general, el segundo, más popular, constituye un caso particular del primero, son presentados a continuación.

**Teorema 1 (Teorema del Ángulo Central)** *En un círculo con centro O y tres puntos sobre su circunferencia A, P, B, si  $P = P_1$  en el arco mayor, la medida del ángulo subtendido  $\angle APB$  siempre es la mitad de la medida del ángulo central  $\angle AOB$ .*

$$\angle AP_1B = \frac{\angle AOB}{2} \quad \alpha_1 = \frac{\theta}{2}$$

*Si  $P = P_2$  se encuentra en el arco menor, el ángulo subtendido es el suplemento de la mitad del ángulo central.*

$$\angle AP_2B = \pi - \frac{\angle AOB}{2} \quad \alpha_2 = \pi - \frac{\theta}{2}$$

El teorema de Tales de Mileto considera el caso en que los puntos A y B están en el diámetro del círculo

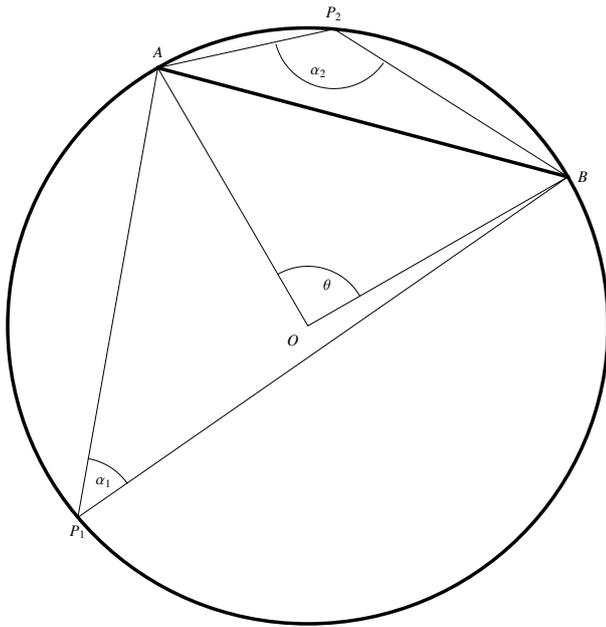


Figura 2. Todos los puntos sobre el arco mayor  $AP_1B$  (menor  $AP_2B$ ) tienen el mismo ángulo de subtendido y el teorema del arco central los relaciona con éste.

**Teorema 2 (Teorema de Tales de Mileto)** El diámetro de un círculo siempre subtende un ángulo recto a cualquier punto del círculo.

Sin embargo, para el caso de dos objetos el conocimiento del ángulo de subtendido no es suficiente para determinar la ubicación del robot a partir de dos referencias ya que los puntos con mismo ángulo de subtendido definen un círculo de posibles soluciones. Es necesario saber además la distancia a las referencias, entonces si es posible determinar la posición del robot, pero no es posible medir distancias perpendiculares al plano imagen. Afortunadamente se tiene que todos los objetos referencia tienen el mismo diámetro (10 cm), medida transversal en toda imagen, luego el tamaño relativo de los objetos es una medida de la distancia relativa de los objetos.

Un parámetro que se puede determinar es el diámetro del círculo  $D$  en que se encuentran los objetos  $A$ ,  $B$  y  $P$ , a partir del conocimiento del ángulo de subtendido, medido, y de la longitud del arco, dimensión conocida al ser conocida la posición de los objetos.

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{AB/2}{R} \implies D = \frac{AB}{\sin \frac{\theta}{2}}$$

por lo que si se observan tres referencias, es posible determinar la posición del robot a partir de los ángulos subtendidos y los tres círculos que ellos generan. Este caso es el objeto de trabajo futuro.

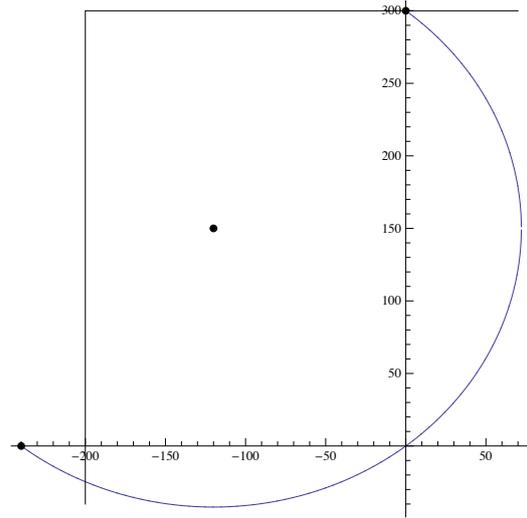


Figura 3. Simplificación de un cuarto de cancha. Posición de las referencias  $\{-240,0\}$  &  $\{0,300\}$ , el arco define puntos con mismo ángulo inscrito  $90^\circ$

### II-C. 3<sup>er</sup> Propuesta: Tamaño relativo

En vista de lo anterior proponemos determinar la ubicación a partir del ángulo subtendido y el tamaño relativo de dos referencias. Los cuales forman un triángulo, con el robot en el vértice, figura 4. La estimación de la posición se hace usando la ley de cosenos, donde se conoce de un triángulo un lado y su ángulo opuesto; y se tiene un estimado de tamaño de los objetos como aproximación de la distancia a los objetos. Ya que todos los objetos fijos en la cancha, porterías y marcadores tienen el mismo diámetro (10 cm), entonces es posible usar la dimensión relativa para hacer un estimado de las distancias, mediante el algoritmo de Newton. La ley de cosenos para los tres objetos

$$A^2 = \widehat{B}^2 + \widehat{C}^2 - 2\widehat{B}\widehat{C} \cos \alpha$$

donde se conocen  $A$  y  $\alpha$ . Y se tiene una estimación de  $B$  y  $C$ . Por lo que esto resulta en el error dado por

$$E = A^2 - \widehat{B}^2 - \widehat{C}^2 + 2\widehat{B}\widehat{C} \cos \alpha$$

ya que las distancias a los objetos  $B$  y  $C$  no se conocen con precisión, pero si se puede determinar fácilmente de la imagen el tamaño relativo de ambos  $d_1 = f \cdot 0.10/C$  y  $d_2 = f \cdot 0.10/B$  en la imagen, donde  $f$  es la distancia focal del lente y 0.10 el diámetro de los objetos, lo que permite referir la distancia de un objeto a la del otro.

$$\widehat{C} = \frac{d_2}{d_1} \widehat{B}$$

entonces esto nos permite simplificar la expresión del error

$$E = A^2 - \left( 1 + \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 2 \frac{d_2}{d_1} \cos \alpha \right) \widehat{B}^2$$

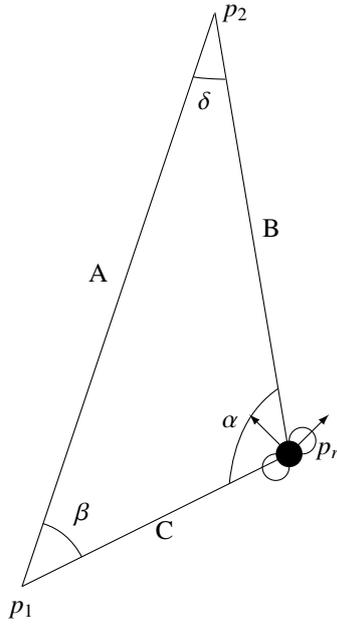


Figura 4. Ejemplo del triángulo que se forma entre dos marcas, denotadas por  $p_1$  y  $p_2$  y el robot  $p_r$  usado en el desarrollo

y aplicando el algoritmo de Newton

$$\widehat{B}_{k+1} = \widehat{B}_k - \gamma \frac{E}{E'} \quad \text{con } \gamma < 1$$

llegar a un valor para  $\widehat{B}$ ,  $\widehat{C}$  y usar la ley de senos para estimar los respectivos ángulos opuestos  $\beta$  y  $\delta$ . Esto nos proporciona una zona dentro de la cual el robot está a partir de las ecuaciones

$$\widehat{\beta} = \arcsin\left(\frac{\widehat{B}}{A} \sin \alpha\right) \quad p_{r_1} = p_1 + \widehat{C} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \\ \sin(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \end{pmatrix}$$

y

$$\widehat{\delta} = \arcsin\left(\frac{\widehat{C}}{A} \sin \alpha\right) \quad p_{r_2} = p_2 + \widehat{B} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \\ \sin(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \end{pmatrix}$$

donde el error se puede estimar a partir de los errores  $\Delta$  de los parámetros calculados

$$\Delta \widehat{\beta} = \frac{\sin \alpha}{A \sqrt{1 - \left(\frac{\widehat{B} \sin \alpha}{A}\right)^2}} \Delta \widehat{B}$$

$$\Delta \widehat{\delta} = \frac{\sin \alpha}{A \sqrt{1 - \left(\frac{\widehat{C} \sin \alpha}{A}\right)^2}} \frac{d_2}{d_1} \Delta \widehat{B}$$

$$\Delta p_{r_1} = \Delta \widehat{C} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \\ \sin(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \end{pmatrix} + \widehat{C} \begin{pmatrix} \sin(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \\ -\cos(\theta_{12} - \widehat{\beta}) \end{pmatrix} \Delta \widehat{\beta}$$

o

$$\Delta p_{r_2} = \Delta \widehat{B} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \\ \sin(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \end{pmatrix} + \widehat{B} \begin{pmatrix} -\sin(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \\ \cos(\theta_{21} + \widehat{\delta}) \end{pmatrix} \Delta \widehat{\delta}$$

y los datos en las tablas anexas en el apéndice.

Todas las dimensiones del campo y de los objetos en él son conocidas, por lo que pueden ser usados para calibrar o autocalibrar la cámara.

Los errores anteriores tienen el defecto de no depender de las mediciones y su respectivos errores. Se hacen tres mediciones en la imagen, los dos diámetros de las columnas (o en nuestro experimento de las bolas  $\{D_1, D_2\}$ ) y el ángulo de subtendido  $\alpha$ . que originan los errores en las mediciones  $\delta R$  y  $\delta \alpha$ . El primer error se estima a partir de

$$\Delta R = \Delta \left( \frac{D_1}{D_2} \right) = \frac{D_1 \Delta D_2 - D_2 \Delta D_1}{D_2^2}$$

y el segundo a partir de la ley de Cosenos

$$B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha = A^2$$

luego

$$2B\Delta B + 2C\Delta C - 2(\Delta B C \cos \alpha + B\Delta C \cos \alpha - BC \sin \alpha \Delta \alpha) = 0$$

de donde  $C = RB$  y  $\Delta C = \Delta RB + R\Delta B$

$$B\Delta B + C(\Delta RB + R\Delta B) - (\Delta B C \cos \alpha +$$

$$B(\Delta RB + R\Delta B) - B(\Delta RB + R\Delta B) \sin \alpha \Delta \alpha) = 0$$

$$\Delta B = \frac{B(R - \cos \alpha) \Delta R + BR \sin \alpha \Delta \alpha}{2R \cos \alpha - 1 - R^2}$$

de donde es posible calcular los errores de los ángulos

$$\Delta \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{B}{A} \sin \alpha\right)^2}} \left( \frac{\sin \alpha}{A} \Delta B + \frac{B}{A} \cos \alpha \Delta \alpha \right)$$

$$\Delta \delta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{C}{A} \sin \alpha\right)^2}} \left( \frac{\sin \alpha}{A} \Delta C + \frac{C}{A} \cos \alpha \Delta \alpha \right)$$

y ser substituidos en las ecuaciones de los errores de la posición  $\Delta p_{r_1}$  y  $\Delta p_{r_2}$  anteriormente presentados.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para probar el algoritmo se usó una fotografía de tres pelotas de tennis separadas por una distancia conocida 5. La cámara usada fue la de un teléfono celular 8 Megapíxeles. Ya que las cámaras usadas en RoboCup tienen resoluciones que van de  $160 \times 120$  píxeles de la HaViMo a 2 Megapíxeles de un DARwin-OP, a la fotografía original se le redujo su resolución a  $\{2048, 1536\}$ ,  $\{640, 480\}$  y  $\{320, 240\}$  píxeles. De la fotografía se conoce el diámetro de las pelotas y la distancia entre ellas. Los resultados son presentados en la tabla siguiente, con los errores de medición correspondientes a un píxel.



Figura 5. Arreglo experimental, tres pelotas de tenis colocadas en el piso con una separación de 2.10m, el origen del referencia se encuentra en la pelota más cercana

Alta resolución {2048, 1536}				
	x	z	dx	dz
2-1	92.8776	47.9424	3.45136	2.6971
3-1	96.1733	49.2138	6.30427	4.14961
3-2	114.79	48.8498	22.9716	6.26739
Mediana resolución {640, 480}				
2-1	87.4459	43.96	10.8369	8.08463
3-1	84.7254	42.135	19.6996	12.2773
3-2	68.2092	38.7508	69.5852	16.9005
Baja resolución {320, 240}				
2-1	104.153	56.7062	21.4782	18.5428
3-2	84.8055	42.0018	39.4561	24.4865
3-2	-1.9762	23.8298	105.969	20.1543

Es claro que si el ángulo de subtendido es pequeño los errores son mayores. Igualmente a una mayor resolución mayor precisión. La aportación del trabajo es la cuantificación de la posición y de los errores. La posición real (aproximada) de la cámara esta en {90, 48}. La principal contribución del error es debida al error en la medición del tamaño de las referencias, la contribución en el error del error en la medición del ángulo es pequeña.

Las imágenes 6, 7 y 8 reconstruyen la posición determinada (punto negro) y la variación en el error inducida por un error de un pixel.

#### IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Formular la ubicación de un robot como un problema de SLAM en la RoboCup, parece no ser correcto. El mapa se conoce. Lo que se desconoce es la posición de los robots en él. Este trabajo presentó la evolución de una propuesta que

empezó como una idea muy burda, tratar de determinar si el robot esta dentro o fuera de la cancha a partir del orden en que aparecen las marcas en la imagen y su evolución a un método para determinar la posición de un robot en la cancha y el análisis del error inducido por las mediciones, que usa información visual. La propuesta se validó en forma práctica, aunque no en una cancha. Su ventaja es que usa información fácil de adquirir en una imagen tomada con la cámara horizontal (sin elevación), es decir con poca deformación que no necesita de homotopía. La desventaja es que supone que las marcas son siempre visibles.

#### REFERENCIAS

- Barman, R., S. Kingdon, J.J. Little, Alan K. Markworth, D.K. Pai, Michael K. Sahota, H. Wilkinson y Y. Zhang (1993). DYNAMO: real-time experiments with multiple mobile robots. En: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*. pp. 261-266.
- Egan, Shaun (2010). Slam literature review. Reporte técnico . Rhodes University.
- Mackworth, Alan K. (1993). On seeing robots. En: *Computer Vision: Systems, Theory and Applications* (A. Basu y X. Li, Eds.). pp. 1-13. World Scientific Press. Singapore. Reprinted in P. Thagard (ed.), *Mind Readings*, MIT Press, 1998.
- Pancham, Ardhisha, Nkgatho Tlale y Glen Bright (23-25 November 2011). Literature review of SLAM and DATMO. En: *4th Robotics and Mechatronics Conference of South Africa (RobMech 2011)*. CSIR International Conference Centre.
- RoboCup (2012). *RoboCup Soccer Humanoid League Rules and Setup (for the 2012 competition in Mexico City)*. final version of June 6, 2012 ed. RoboCup Humanoid League. <http://www.tzi.de/humanoid/>.
- Sahota, Michael K. y Alan K. Mackworth (1994). Can situated robots play soccer?. En: *Proceedings of the Artificial Intelligence '94*. pp. 249-254.
- Spero, Dorian Jack y R.A. Jarvis (2007). A review of robotic SLAM. Reporte Técnico MECSE-4-2007. Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University. Melbourne, Australia.

#### APÉNDICE

##### A. Dimensiones de las Referencias

Referencias laterales altura 45 cm, diámetro 10 cm, con tres segmentos de 15 cm de colores alternados.

Portería altura al travesaño 80 cm, distancia entre postes 150 cm, postes y travesaño cilíndricos de diámetro 10 cm.

##### B. Posiciones de las Referencias en el campo

Objeto	Posición en el campo	
	x (cm)	y (cm)
Centro portería azul	0	300
Poste izq. portería azul	-80	300
Poste der. portería azul	80	300
Marca azul-amarillo-azul	-240	0
Centro portería amarilla	0	-300
Poste izq. portería amarilla	80	-300
Poste der. portería amarilla	-80	-300
Marca amarilla-azul-amarilla	240	0

Referencial; origen ({0,0}) en el centro del campo  
Eje x en la dirección transversal del campo, dirección positiva de la marca azul-amarilla-azul a la marca amarilla-azul-amarilla  
Eje y en la dirección longitudinal del campo, dirección positiva de la la portería amarilla a la portería azul

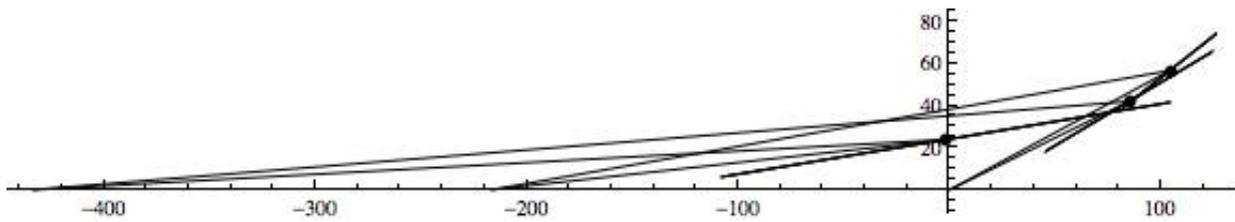


Figura 6. Caso fotografía de baja resolución ( $320 \times 240$ ), posición estimada y su variación para un error de un pixel

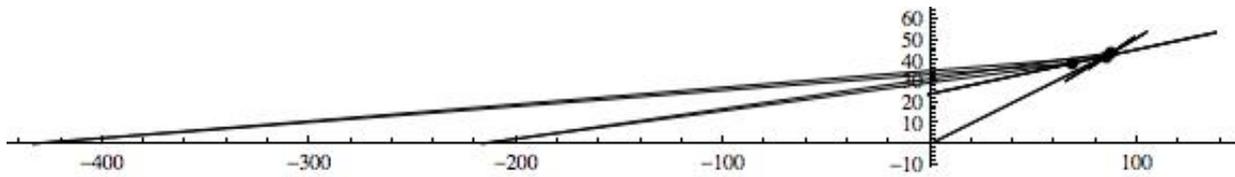


Figura 7. Caso fotografía de mediana resolución ( $640 \times 480$ ), posición estimada y su variación para un error de un pixel

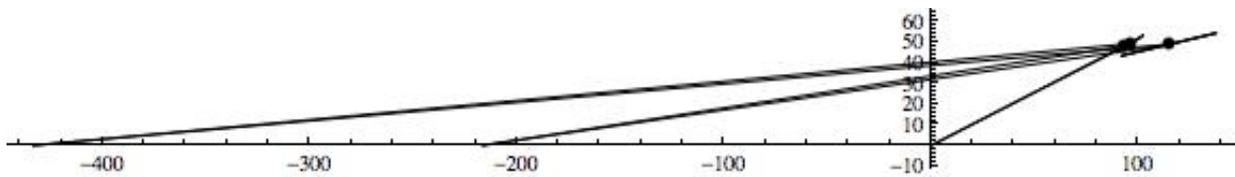


Figura 8. Caso fotografía de alta resolución ( $2048 \times 1536$ ), posición estimada y su variación para un error de un pixel

### C. Distancias y ángulos entre referencias

Objeto (1) Izquierda — (2) Derecha	Distancia $A$ (cm)	Ángulo $\theta_{12}$ ( $^{\circ}$ )
(1) marca azul-amarilla-azul — (2) portería azul	340	61.9275
(1) portería azul — (2) marca amarilla-azul-amarilla	340	-61.9275
(1) marca amarilla-azul-amarilla — (2) portería amarilla	340	-118.075
(1) portería amarilla — (2) marca azul-amarilla-azul	340	118.075
(1) poste izq (2) poste der portería azul	160	0
(1) poste izq (2) poste der portería amarilla	160	180

Ángulos medidos en el sentido trigonométrico, objetos vistos desde el interior del campo