

ROBOTS SOCIALES: atención visual mediante algoritmos metaheurísticos

PROTOCOLO

1. ANTECEDENTES

Un robot social es aquel que interactúa y se comunica con las personas u otros sistemas físicos autónomos siguiendo comportamientos, patrones y normas sociales. Entre las tareas que un robot social puede desempeñar se encuentran: asistencia humana, compañía, cuidado y entretenimiento de personas mayores, etc.

Por lo que se requiere que dicho robot tenga la apariencia, lenguaje, y comportamientos aceptables (naturales, amigables, no robotizados) por el humano [1, 2, 3].

Así, para interactuar de manera adecuada, la implementación de un robot social propone un sin número de retos que abren nuevos campos de investigación entre varias disciplinas como: la inteligencia artificial, robótica, visión computacional, psicología cognitiva, ciencias cognitivas y neuro-ciencias.

Por ejemplo, este tipo de robots necesitan reconocer la voz humana y poder reproducirla con cierta modulación. Así mismo, deben tener la capacidad de reconocer las expresiones faciales, los gestos y las reacciones humanas y disponer de una cierta capacidad expresiva [4, 5]. En este sentido, es necesario que el robot posea un rostro, con componentes faciales básicos como ojos, párpados, cejas, mejillas, labios, mandíbula y frente.

En una etapa más desarrollada, el robot debe poder interpretar la conducta social de las personas a través de la construcción de elaborados modelos cognitivos-afectivos. De esta manera, el robot podría reconocer el estado de ánimo del usuario (por el tono de su voz) e, incluso, intentar modificarlo si lo considera necesario.

El reconocimiento visual, también ha jugado un papel importante en el análisis del comportamiento de humanos mediante el estudio de las posturas y el caminado personas [6, 7, 8, 9] y es un área de investigación de gran interés en la comunidad científica.

Por otro lado, uno de los retos de los robots sociales, es la aceptación por parte de los usuarios. Los resultados indican que especialmente las variables de utilidad, adaptabilidad, agradabilidad, sociabilidad, compañerismo y percepción del comportamiento son importantes para que el robot sea aceptado por un humano [10, 11].

También se ha determinado que su aceptación en la sociedad no es posible sin que ellos exhiban una inteligencia social. En este sentido, se sabe que el proceso de la “atención” juega un rol muy importante, ya que afecta otros procesos cognitivos como la percepción, selección de acciones, toma de decisiones, planeación, emoción y aprendizaje.

Es por eso que la investigación en el proceso de la “atención” sigue siendo un reto en todos los niveles de la percepción visual [12, 13], toma de decisiones y la planificación.

Este proyecto en específico propone investigar e implementar algoritmos de visión artificial optimizados mediante metaheurísticas que aporten primitivas en la construcción del proceso de “atención”. Así como también aportar nuevos métodos para el reconocimiento visual del

comportamiento de humanos con la finalidad de contribuir al desarrollo de la inteligencia social en un robot.

Para lo cual se establece como hipótesis, que es posible proponer nuevos métodos para que un robot social sea capaz de establecer contacto y seguimiento visual con las personas. Por ejemplo, que el robot pueda seguir visualmente los movimientos de un interlocutor (cara, cuerpo, brazos, manos). Para probar dicha hipótesis, el proyecto contempla la creación de prototipos de robots para poner en práctica y experimentar estas propuestas de percepción visual dentro de diversos ambientes con grupos de humanos.

La investigación sobre sistemas de visión artificial en robots sociales se ha propuesto desde los inicios de la robótica social. La visión ha sido un proceso muy importante para el ser humano y su capacidad de percibir los entornos sociales. Por otro lado, es importante mencionar que la habilidad de reconocer objetos y analizar la información visual son procesos complejos que le han tomado al ser humano miles de años de evolución. Además, el ser humano no solo depende de la visión para percibir su entorno social sino de la interacción de esta con el habla y expresiones de los demás personas, esta situación genera un interesante nicho de investigación.

Trabajos anteriores y algunos recientes [14-20] proponen resolver los problemas de detección de primitivas geométricas y otras características, mediante el uso de técnicas clásicas de visión artificial, las cuales en su mayoría están basadas en la transformada de Hough.

Por otro lado, los algoritmos metaheurísticos, han atraído la atención de la comunidad científica debido a sus capacidades para resolver problemas de optimización que para ciertas aplicaciones han demostrado moderada demanda de costo computacional. Estos algoritmos se centran en el análisis colectivo del comportamiento de agentes relativamente simples trabajando en sistemas descentralizados. Típicamente los algoritmos metaheurísticos, están formados por poblaciones, en donde sus miembros mantienen comunicación entre si, dentro de un ambiente común. A pesar de que el comportamiento de cada miembro está regulado por un control no centralizado, cada miembro puede resolver tareas complejas mediante el análisis de un modelo global y cooperación entre miembros. De esta forma, los modelos de comportamiento global con interacción entre sus miembros se han vuelto una inspiración para resolver problemas complejos de ingeniería y generar más algoritmos metaheurísticos. Como ejemplo de algunos sistemas que se han tomado como base se tienen: colonias de hormigas, de bacterias, de abejas, rebaños de animales, congregaciones de aves, cardúmenes de peces, partículas eléctricamente cargadas, el sistema inmunológico, etc.

Algunos de los algoritmos metaheurísticos más utilizados para resolver problemas de optimización dentro del área de las ciencias computacionales son: Algoritmos Genéticos (GA), Optimización de Colonias de Hormigas Artificiales (ACO), Autómatas de Aprendizaje (LA), Colonias de Abejas Artificiales (ABC), Evolución Diferencial (DE), Optimización por electromagnetismo (EMO), Sistemas Inmunes Artificiales (AIS), Optimización basada en búsqueda de la armonía (HS), entre otros.

Los algoritmos metaheurísticos, desde hace ya tiempo han probado ser útiles en varias áreas de aplicación, ofreciendo opciones para la optimización, aprendizaje de máquina, reconocimiento de patrones, detección de formas, así como la detección de primitivas geométricas en imágenes [21-23].

Actualmente, algunos sistemas metaheurísticos han sido aplicados para resolver problemas complejos de visión computacional. Por ejemplo, Chih-Chih [24] aplico *Particle Swarm*

Optimization (PSO) o “optimización de enjambres de partículas” para la segmentación de imágenes. Le Hégarat-Masclé et al. [25] propuso un modelo no-estacionario de Markov para la regularización de imágenes, el cual utiliza el *Ant Colony Optimization* (ACO) u optimización de colonias de hormigas. En [26], Hammouche et al. Propusieron un método multi-nivel que permite la determinación de un número apropiado de bordes para la segmentación de imágenes. Ese método combina los Algoritmos Genéticos (GA) con la “transformada de ondeletas” o *wavelet transform*. Recientemente, Baştürk & Günay [27] propusieron un detector de bordes para imágenes basado en redes neuronales celulares optimizadas por el algoritmo de Evolución Diferencial. Sin embargo, los algoritmos metaheurísticos han sido poco utilizados en técnicas de visión aplicadas a robots.

Así, inspirados en experiencias propias en la implementación de algunos algoritmos metaheurísticos (LA, ABC, DE, EMO, AIS y HSO) para la solución de problemas en el campo de la visión artificial, específicamente para la detección de primitivas geométricas en imágenes [28-40] y propuestas originales en el campo de computo evolutivo como el Collective Animal Behavior (CAB) [41] y el desarrollo de algoritmos de visión artificial [42-57], así como en la realización de proyectos de investigación sobre el control del caminado y balance de robots humanoideos [58-69], los autores de esta propuesta proponen la implementación de la **atención visual mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a robots sociales** (figura 1).

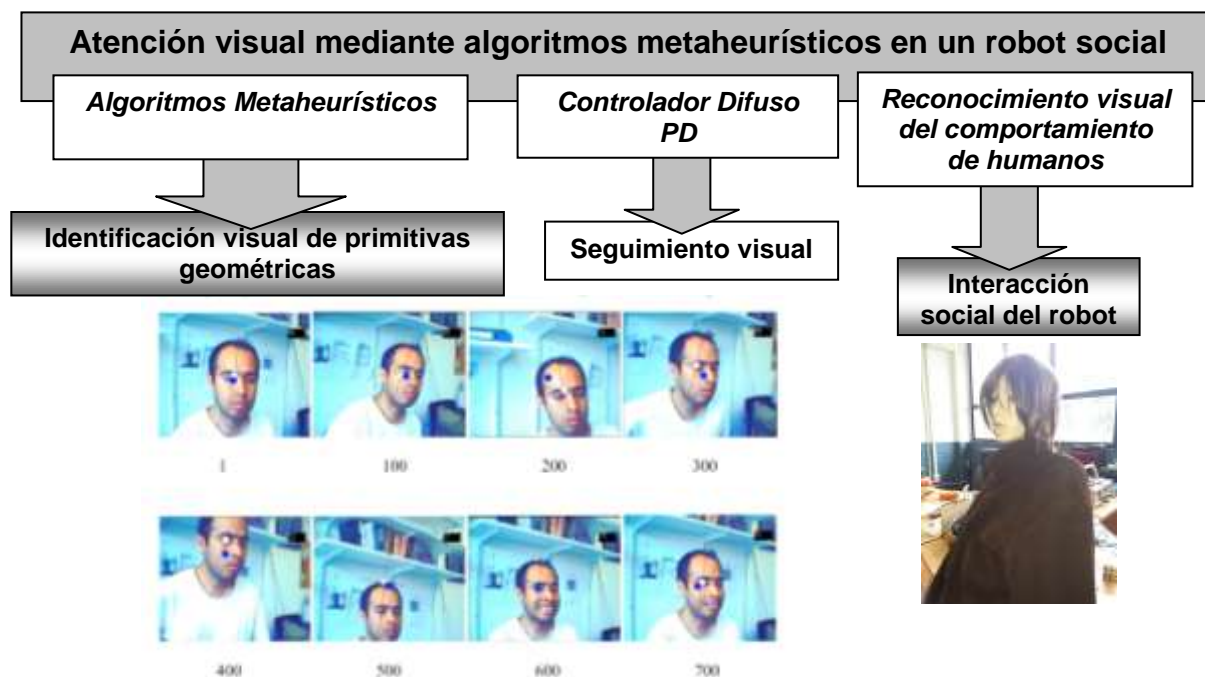


Fig. 1 Propuesta para la implementación de la atención visual mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a robots sociales

Recientemente en la literatura se han presentado comparaciones respecto al rendimiento de los algoritmos metaheurísticos, sin embargo solo se considera la precisión encontrada para un conjunto específico de funciones [70], existiendo muy pocos trabajos que comparen el desempeño de los algoritmos metaheurísticos en tiempo real cuando se trata de problemas de función no explícita [71] (black-box problems). Considerando lo anterior, una aportación de este proyecto será el determinar el algoritmo metaheurístico entre los seleccionados (LA, ABC, DE, EMO, AIS o HS), que basado en comparaciones de desempeño y eficiencia, genere los mejores resultados en cuanto a la identificación de primitivas geométricas desde una plataforma robótica humanoide en tiempo real.

Tomando en cuenta lo anterior y que los autores de la presente propuesta de investigación han contribuido y contribuyen de forma importante al desarrollo de algoritmos de visión artificial [28-57] y esquemas de caminado y balance en robots humanoides [58-69], en el presente proyecto proponen extender y aplicar las experiencias adquiridas en visión artificial, para la implementación de la **atención visual mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a robots sociales**, utilizando primitivas geométricas que serán encontradas mediante algoritmos metaheurísticos ejecutados en tiempo real por los recursos de computo embebidos al robot.

Es importante mencionar que los autores cuentan con un primer prototipo de robot social (Figura 2), desarrollado en la Unidad de Investigación de la Universidad Azteca de Guadalajara (<http://cuazteca.edu.mx/invest/>), así como con diversas aplicaciones de visión artificial en tiempo real y en colaboración Universidad Libre de Berlín, han construido prototipos propios de robots humanoides con diferentes GDL (grados de libertad), ver Figura 3, a), b), c), y d) los cuales ejecutan patrones de caminado suave y se balancean exitosamente. Además se cuenta con 8 bases humanoides de 16 GDL (Grados de libertad) modificadas con controladores y electrónica propia, susceptibles de ser mejoradas con electrónica para implementar la visión artificial metaheurística. A partir de estos prototipos, han desarrollado diferentes productos [28-69] entre los que destacan: publicaciones, capítulos de libro, libros y un título de patente para un robot humanoide expedido por el IMPI, así como también un trámite de Patente ante el IMPI sobre un levitador magnético para un robot humanoide por lo que la experiencia de los autores en el área de visión artificial y control de robots humanoides refuerza las posibilidades de éxito de esta propuesta de investigación.



Fig. 2 Primer prototipo de robot social desarrollado en la Unidad de Investigación de la Universidad Azteca de Guadalajara

Los autores de este proyecto mantienen además colaboración con varios institutos nacionales (CINVESTAV-GDL, CIC-IPN) e internacionales (FU-Berlín en Alemania, Universidad Complutense de Madrid) mediante una red de colaboración FONCICYT con el objetivo de compartir información sobre proyectos afines de visión artificial y robótica. Por último en este año se están integrado como miembros de la Red Temática de Robótica y Mecatrónica del CONACYT.

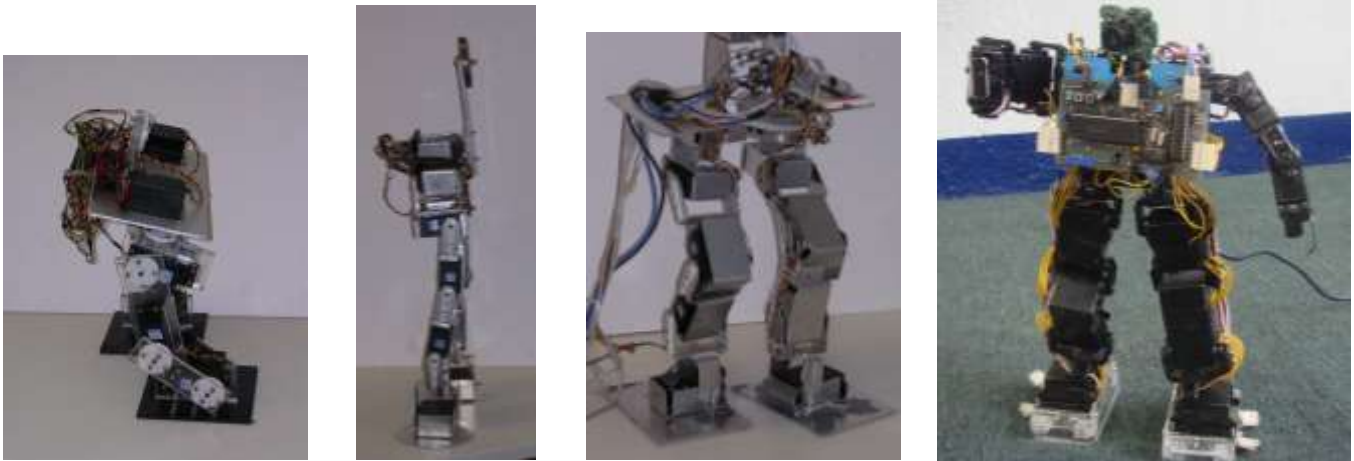


Fig. 3 Prototipos de robots bípedos desarrollados por los autores: a) versión con 8 GDL b) versión con 11 GDL y sistema de péndulo simple invertido para el balance c) versión de 10 GDL, con actuadores laterales para el balance, y d) base humanoide de 16 GDL modificada con controladores, electrónica propia y prototipo de sistema de visión artificial embebido.

Las principales aportaciones del presente proyecto al avance del conocimiento científico y del desarrollo tecnológico son: a) propuesta original de algoritmos metaheurísticos aplicados a la visión artificial, específicamente de algoritmos metaheurísticos (LA, ABC, DE, EMO, AIS y HS) aplicados a la identificación de primitivas geométricas que sean utilizadas como referencias para la construcción del proceso de “atención”. Así como también aportar nuevos métodos para el reconocimiento visual del comportamiento de humanos con la finalidad de contribuir al desarrollo de la inteligencia social en un robot. b) Implementación en tiempo real de los algoritmos metaheurísticos para la detección visual de primitivas geométricas de referencia para la construcción del proceso de “atención”. Así como también aportar nuevos métodos para el reconocimiento visual del comportamiento de humanos, con posibilidad de aplicaciones futuras en: rescate, vigilancia, situaciones de desastres naturales, inundaciones, temblores, incendios, y de lugares peligrosos o de alto riesgo en la industria petroquímica, minera, etc. Así como para la elaboración de prótesis médicas para pacientes sin o con problemas en extremidades locomotoras, etc. Todas aplicaciones importantes para México y el mundo.

2. HIPOTESIS

Los autores de este proyecto proponen que es posible proponer nuevos métodos para que un robot social sea capaz de establecer contacto y seguimiento visual con las personas para así realizar el reconocimiento visual del comportamiento de humanos. Por ejemplo, que el robot pueda seguir visualmente los movimientos de un interlocutor (cara, cuerpo, brazos, manos). Lo anterior mediante visión artificial mediante algoritmos metaheurísticos, a través de dos tareas: 1. Se propone utilizar algoritmos metaheurísticos para la identificación visual de primitivas geométricas de referencia. 2. Reconocimiento visual del comportamiento de humanos. Una vez hecho el contacto visual con las personas, se procede a realizar la identificación de las posturas de los mismos para así determinar posibles estados anímicos.

Para probar dicha hipótesis, el proyecto contempla la creación de prototipos de robots para poner en práctica y experimentar estas propuestas de percepción visual dentro de diversos ambientes con grupos de humanos.

A continuación se presenta de manera condensada cada algoritmo metaheurístico (LA, ABC, DE, EMO, AIS y HS) a utilizar en este proyecto para la identificación de las primitivas geométricas. Posteriormente se expone como poder estimar la posición del robot a partir de la identificación visual de estas primitivas geométricas que servirán de referencia al controlador de balance. Después se explica brevemente el controlador difuso PD para controlar el balance del robot. Posteriormente se presenta brevemente el algoritmo de interpolación cúbica utilizado para generar las rutinas de avance durante las fases de caminado del robot. Finalmente se describe muy brevemente la implementación en tiempo real en los robots humanoides que ya se poseen.

Algoritmos metaheurísticos

Algoritmo de Colonias Artificiales de Abejas (ABC)

Este algoritmo es inspirado en el comportamiento de las colonias naturales de abejas. Dicho algoritmo comienza produciendo una población inicial distribuida aleatoriamente (Posiciones de las Fuentes de comida). Después la función objetivo evalúa las soluciones candidato, asignándoles un valor (cantidad de néctar). Guiándose mediante los valores de la función objetivo, las soluciones candidato evolucionan mediante las diferentes operaciones del ABC (tipos de abeja) hasta que algún criterio de paro sea satisfecho.

Algoritmos de Selección Clonal (ASC)

En el algoritmo de selección clonal, el antígeno (A_n) representa el problema a ser resuelto mediante la optimización de sus parámetros, mientras que los anticuerpos (A_c) son soluciones candidatas al problema. La afinidad anticuerpo-antígeno es medida mediante una función objetivo. Dicha función, utilizando diferentes operadores inspirados en el sistema inmunológico humano, controla el proceso de modificación de las soluciones (Anticuerpos).

Optimización con Evolución Diferencial (DE)

Los DE son algoritmos simples de búsqueda directa en funciones globales multimodales. De forma similar a los algoritmos genéticos, los métodos de evolución diferencial utilizan operadores de cruce y mutación, así como un mecanismo de selección. Su principal diferencia reside en que la evolución diferencial considera la mutación como su principal operador mientras que la operación de cruce es no uniforme, es decir, se toman algunos padres con mayor frecuencia que otros para la generación de vectores hijo. Esta medida, distribuye la información de combinaciones exitosas de forma más eficiente, contribuyendo a que la búsqueda se concentre en áreas promisorias del espacio de solución. El algoritmo de DE considera un operador de mutación novedoso que se basa en las diferencias de pares aleatorios de solución. Es importante mencionar que el algoritmo DE es fácil de usar y adaptar para la optimización de funciones discretas, así como muy eficiente en particular para la optimización con funciones de castigo.

Optimización por electromagnetismo (EMO)

El EMO es un método flexible basado en población que permite encontrar la solución a problemas de optimización para un solo objetivo. Sus principios básicos siguen los postulados del electromagnetismo, donde las partículas cargadas emplean su esquema de atracción-repulsión para moverse en el espacio de soluciones hasta encontrar la opción óptima. Dicha dinámica entre partículas puede corresponder a los operadores de reproducción, mutación y cruce que se utilizan en los algoritmos genéticos. Sin embargo, en recientes resultados, los métodos EMO han demostrado convergencia y una buena precisión con respecto a los valores óptimos. Su principal desventaja reside en su complejidad computacional que demanda largos tiempos de ejecución.

Optimización basada en el autómata de aprendizaje (LA)

El LA es una técnica adaptativa para la selección de decisiones que opera en ambientes aleatorios y que permite realizar mejoras en la aproximación de una función progresivamente como resultado del aprendizaje. Dado que esta técnica está orientada al aprendizaje en ambientes inciertos, se han generado resultados muy interesantes para la optimización de funciones multimodales cuando solamente se dispone de evaluaciones ruidosas de la función a optimizar. La operación el algoritmo utiliza una función de densidad de probabilidad para definir el siguiente punto de búsqueda en el espacio de parámetros. Su principal ventaja es que el método no requiere conocimiento previo del ambiente o de cualquier otra referencia analítica a la función a optimizar asegurando convergencia, aun si se consideran distintos parámetros al mismo tiempo. Por esta razón, recientemente se han presentado algunas implementaciones muy interesantes de LA para la optimización de funciones complejas multimodales con resultados en áreas como el control adaptativo, el diseño de filtros digitales y la visión por computadora.

Optimización basada en búsqueda de la armonía (HS)

Es un algoritmo optimización inspirado en la improvisación musical de nuevas armonías obtenidas mientras se esta tocando. En el HS cada "armonía" es una solución candidata. El HS básico consiste de tres etapas: 1. Inicialización de una memoria (HM). Al iniciar el algoritmo, se genera aleatoriamente una población de "armonías" que son almacenadas en la memoria. 2. Improvisación de nuevos vectores de armonía. La generación de nuevas armonías candidatas se realiza a partir de los elementos contenidos en la memoria. Ya sea re-inicializándolo aleatoriamente o perturbándolo alrededor de una vecindad. 3. Actualización de la HM. Se realiza mediante la comparación de las nuevas armonías candidato y el peor vector de armonías en la HM. El proceso anterior se repite hasta que se alcanza un cierto criterio de terminación.

La figura 3 muestra el diagrama de flujo general para los algoritmos metaheurísticos.

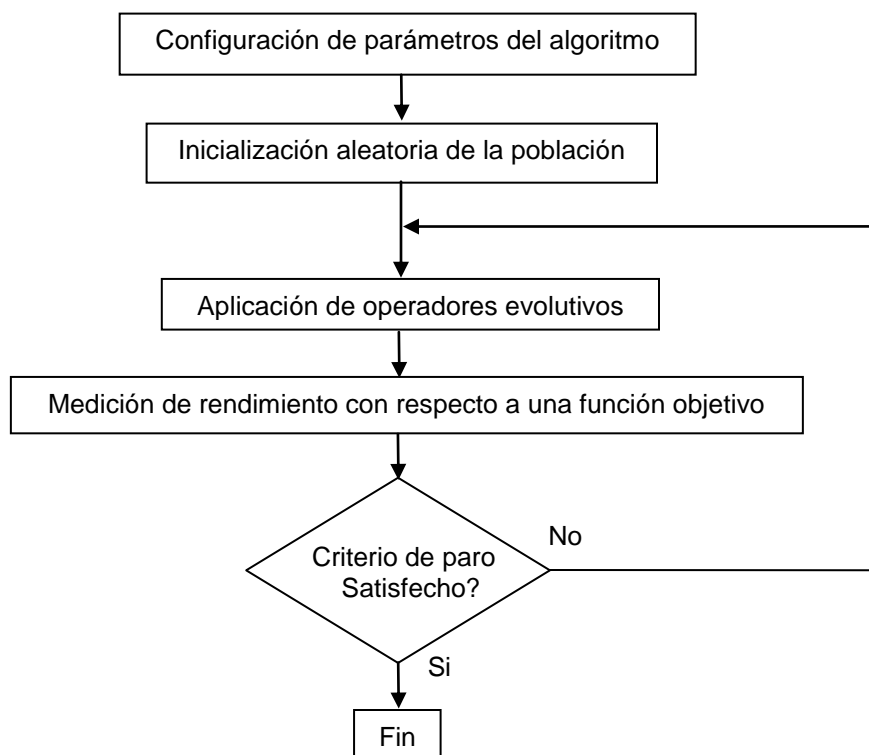


Fig. 3 Diagrama de flujo general para los algoritmos metaheurísticos

Estimación de la Posición del Robot a partir de la Identificación Visual de Primitivas Geométricas.

Para simplificar el proceso de determinar la posición de la cámara con respecto a primitivas geométricas de referencia, se asume que las características (puntos de interés) del objeto referencia se encuentran localizados en el mismo plano. Así por ejemplo, en el objeto referencia se podrían utilizar nueve puntos de interés equidistantes entre si y en el mismo plano como se muestra en la figura 4.

Cada punto de interés oP_i es representado por el vector homogéneo en el plano del objeto de referencia $\{O\}$, como lo muestra la ecuación (10), y es visualizado como oP_i en el plano de la cámara, $\{C\}$, como se muestra en (11).

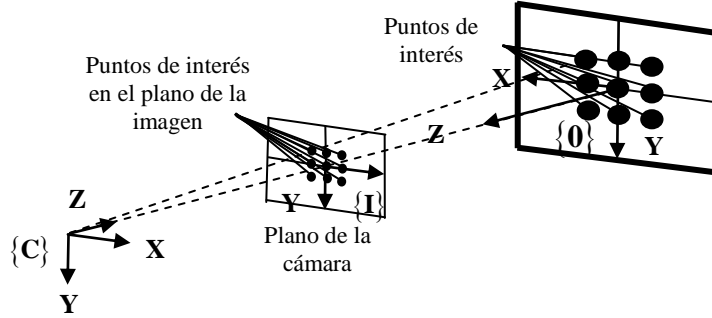


Fig. 4. modelo de la cámara para proyectar cP_i en el plano de la imagen.

$${}^oP_i = ({}^oX_i, {}^oY_i, {}^oZ_i, 1), \quad (i = \{1, 2, \dots, 9\}) \quad [10]$$

$${}^cP_i = {}^cH_o {}^oP_i,$$

$${}^cH_o = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [11]$$

En la matriz homogénea cH_o en (11), R es una matriz rotacional y T es un vector de traslación. En el plano de la imagen $\{I\}$, cada punto de interés cP_i en el plano de la cámara es representado por un vector de dos dimensiones cuyas coordenadas son obtenidas por la proyección de la perspectiva del punto usando un modelo de cámara tipo "pin-hole". Como se muestra en la figura 4. El punto proyectado en el plano de la imagen es representado por $p_i = (x_i, y_i, 1)$.

La proyección de la perspectiva usando el modelo de la cámara tipo "pin-hole" genera un punto de interés en tres dimensiones ${}^c p_i = ({}^cX_i, {}^cY_i, {}^cZ_i, 1)$ en el plano de la cámara hacia $p_i = (x_i, y_i, 1)$ en el plano de la imagen, mediante la siguiente matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{{}^cZ_i} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad [12]$$

Así, el objetivo es extraer el punto de interés ${}^c p_i = ({}^cX_i, {}^cY_i, {}^cZ_i, 1)$ en el plano de la cámara de manera inversa al punto de interés $p_i = (x_i, y_i, 1)$ en el plano de la imagen, y después derivar cH_o usando las interrelaciones entre las correspondencias cP_i y oP_i . Para derivar cP_i a partir de p_i en la imagen, p_i debe de representarse utilizando las variables internas en el espacio de la imagen:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot s_x & f \cdot s_\theta & u_0 \\ 0 & f \cdot s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad [13]$$

En (13), s_x y s_y son los tamaños horizontales y verticales respectivamente de un píxel de la imagen, $f \cdot s_\theta$ es la distancia focal expresada en píxeles y (u_0, v_0) son las coordenadas del centro de la imagen, tal que el eje óptico de la cámara atraviesa este punto para ser proyectado en el plano de la imagen. Debido a que las distorsiones causadas por los lentes de la cámara se pueden calibrar mediante el algoritmo descrito en (14), aunque las variables de distorsión de los lentes no son consideradas. Ya que los puntos de interés se encuentran localizados en el plano X-Y del objeto de referencia, como se muestra en la Fig. 4, la coordenada Z es cero. En el plano de la cámara, dicho punto puede ser representado como ${}^c\mathbf{P}_i = ({}^cX_i, {}^cY_i, {}^cZ_i, 1)$, ($i=1\dots9$), mientras que en el espacio de la imagen se representa como (u_i, v_i) . Para derivar inversamente a ${}^c\mathbf{P}_i$ desde (u_i, v_i) la ecuación (14) es calculada a partir de (11)-(13).

$$\begin{aligned} f \cdot s_x \cdot {}^0X_i \frac{R_{11}}{T_z} + f \cdot s_x \cdot {}^0Y_i \frac{R_{12}}{T_z} - (u_i - u_0) \cdot {}^0X_i \frac{R_{31}}{T_z} \\ - (u_i - u_0) \cdot {}^0Y_i \frac{R_{32}}{T_z} f \cdot s_x \frac{T_x}{T_z} = u_i - u_0, \\ f \cdot s_y \cdot {}^0X_i \frac{R_{21}}{T_z} + f \cdot s_y \cdot {}^0Y_i \frac{R_{22}}{T_z} - (v_i - v_0) \cdot {}^0X_i \frac{R_{31}}{T_z} \\ - (v_i - v_0) \cdot {}^0Y_i \frac{R_{32}}{T_z} f \cdot s_y \frac{T_y}{T_z} = v_i - v_0, \end{aligned} \quad [14]$$

A partir de las coordenadas de los nueve puntos de interés del objeto referencia, como se muestra en (14), se puede obtener (15) que incluye los componentes de ${}^c\mathbf{H}_o$. La matriz objetivo es obtenida después como se muestra en (16).

$$\begin{aligned} \mathbf{AK} = \mathbf{B} \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} fs_x {}^0X_1 & fs_x {}^0Y_1 & 0 & 0 & -(u_1 - u_0) {}^0X_1 & -(u_1 - u_0) {}^0Y_1 & fs_x & 0 \\ 0 & 0 & fs_y {}^0X_1 & fs_y {}^0Y_1 & -(v_1 - v_0) {}^0X_1 & -(v_1 - v_0) {}^0Y_1 & 0 & fs_y \\ fs_x {}^0X_2 & fs_x {}^0Y_2 & 0 & 0 & -(u_1 - u_0) {}^0X_2 & -(u_1 - u_0) {}^0Y_2 & fs_x & 0 \\ 0 & 0 & fs_y {}^0X_2 & fs_y {}^0Y_2 & -(v_1 - v_0) {}^0X_2 & -(v_1 - v_0) {}^0Y_2 & 0 & fs_y \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ fs_x {}^0X_9 & fs_x {}^0Y_9 & 0 & 0 & -(u_9 - u_0) {}^0X_9 & -(u_9 - u_0) {}^0Y_9 & fs_x & 0 \\ 0 & 0 & fs_y {}^0X_9 & fs_y {}^0Y_9 & -(v_9 - v_0) {}^0X_9 & -(v_9 - v_0) {}^0Y_9 & 0 & fs_y \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{R_{11}}{T_z} & \frac{R_{12}}{T_z} & \frac{R_{21}}{T_z} & \frac{R_{22}}{T_z} & \frac{R_{31}}{T_z} & \frac{R_{32}}{T_z} & \frac{T_x}{T_z} & \frac{T_y}{T_z} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad [15]$$

$$\mathbf{B} = [u_1 - u_0 \quad v_1 - v_0 \quad u_2 - u_0 \quad v_2 - v_0 \quad \dots \quad u_9 - u_0 \quad v_9 - v_0]^T$$

La ecuación (15) muestra que las coordenadas de al menos 4 puntos de interés deben de ser medidos con exactitud para obtener a \mathbf{K} . En otras palabras, esto significa que solo 4 puntos de interés son suficientes para obtener ${}^c\mathbf{H}_o$, si estos son medibles. Debido a la posibilidad de detectar falsos puntos de interés debido al ruido de la imagen de entrada, es preferible utilizar nueve puntos de interés del objeto de referencia y las coordenadas de los puntos de interés medidas en el plano de la imagen son aplicadas a la ecuación (16) para encontrar \mathbf{K} usando el método de los mínimos cuadrados.

$$\mathbf{K} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad [16]$$

Para calcular T_z en \mathbf{K} es necesario aplicar la propiedad de la matriz rotacional, que considera que los vectores son ortogonales y también la condición de que T_z es mucho mas grande que f .

$$T_z = f + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{k_1^2 + k_3^2 + k_5^2} + \sqrt{k_2^2 + k_4^2 + k_6^2}} \right] \quad [17]$$

En (17), K_i es el i -esimo elemento del vector \mathbf{K} en (15). La solución de T_z es el promedio de dos valores calculados, y la matriz de transformación homogénea ${}^c\mathbf{H}_o$ entre el plano de la cámara y el objeto de referencia. Como se muestra en la figura 5, la matriz homogénea ${}^c\mathbf{H}_o$ puede determinar la posición relativa del robot con respecto a las primitivas geométricas de referencia.

Control del Balance Mediante Información Visual

Para implementar el control del balance mediante información visual en un robot humanoide se plantea colocar una cámara en la parte superior del robot de modo que el entorno del mismo pueda ser determinado con la información de la posición de la cámara previamente calculada como se muestra en la figura 5.

Algunos miembros del equipo de investigación cuentan con algunas experiencias en el control visual de robots y en el diseño de algoritmos de control para el balance de robots humanoides mediante el "Zero Moment Point" (ZMP) [50-59] con sensores activos como: acelerómetros, giroscopios, inclinómetros y sensores de presión. En este proyecto se propone utilizar también el ZMP calculado a partir de la trayectoria del Centro de Masa (COM, por sus siglas en ingles), pero en lugar de sensores activos se plantea el uso de la información visual provista por la cámara de video instalada en el humanoide. El COM puede ser representado por la relación de transformaciones:

$$H_m = H_o ({}^m H_c {}^c H_o)^{-1} = H_o {}^o H_c {}^c H_m$$

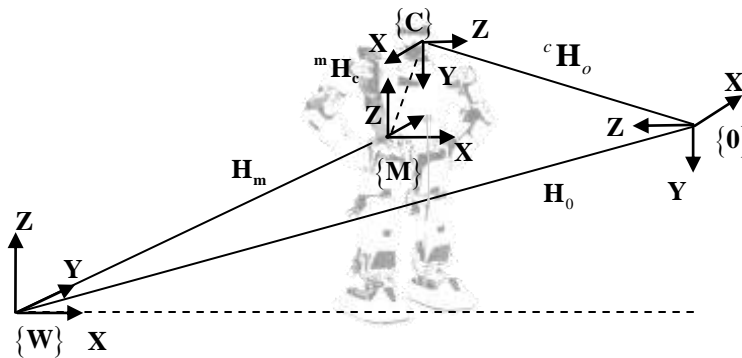


Fig. 5. Relaciones entre los planos del robot.

Dado que el COM se mide a partir de la primitiva geométrica de referencia, puede establecerse una relación entre el COM detectado en la imagen y el correspondiente ZMP asociado al Robot. Para mas detalles del calculo del ZMP ver [62].

De este modo, el control del balance se basa en utilizar la señal de error entre el ZMP de referencia (${}^* \mathbf{P}_x$) y el calculado en tiempo real (\mathbf{P}_x) detectado a partir en la imagen, tal y como se muestra en la figura 6. Debido a que el ZMP calculado a partir de la visión contiene ruido, el

cálculo del ZMP en tiempo real se realizará mediante el filtro de Kalman. El filtro de Kalman estima el ZMP a partir de la corrección del COM, utilizando características y primitivas geométricas contenidas en la imagen y considerando el ruido inherente en la misma.

Definiendo al error $e(k)$ como la diferencia entre el ZMP calculado por el Filtro de Kalman (determinado a partir de la imagen) y el ZMP aportado por la trayectoria de referencia en el instante k . Después la señal de error $e(k)$ es tratada por el controlador difuso PD [47-48], dicho controlador calcula las señales de los motores para reducir la diferencia entre la trayectoria del ZMP a seguir y el calculado por el Filtro de Kalman. Así, para el control de balance del robot humanoide, es necesario definir un sistema de ecuaciones del filtro de Kalman:

En donde el vector de estado $\mathbf{x}(k)$ define la posición, velocidad y aceleración del COG y la matriz de transición \mathbf{A} transforma el estado actual al siguiente estado. El producto de la matriz de entrada \mathbf{B} y la entrada $\mathbf{u}(k)$ se considera como la entrada externa del filtro de Kalman. El vector $\mathbf{w}(k)$ es el error del sistema, el cual tiene la propiedad de ruido blanco Gaussiano (media cero).

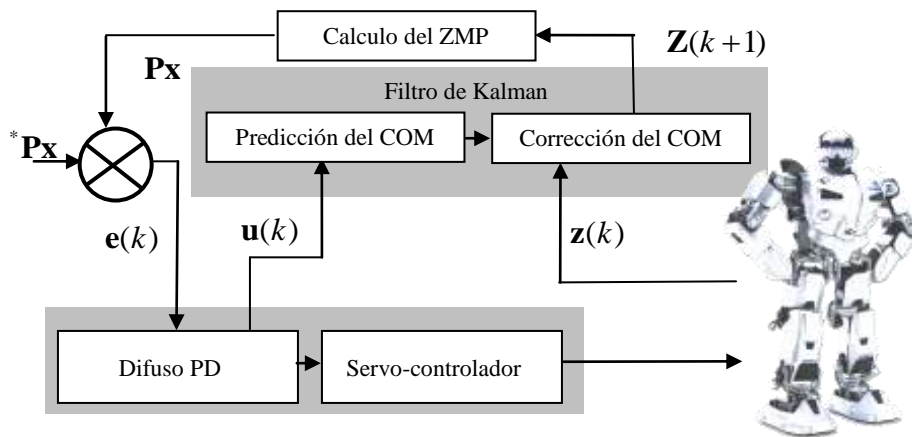


Fig. 6. Control del balance del robot humanoide.

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k-1), \quad [18]$$

$$\mathbf{x}(k) = [x \quad y \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad \ddot{x} \quad \ddot{y}]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{w}(k) : \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}_1),$$

Si la relación entre el sistema de estados y la medición es lineal, la ecuación de medición es:

$$\hat{\mathbf{z}}(k) = \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{v}(k), \quad [19]$$

$$\mathbf{z}(k) = [x_{com} \quad y_{com}]^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}(k) : \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}_2),$$

Donde el vector $\mathbf{z}(k)$ representa la posición del robot calculada a partir de la información visual. La matriz de medición \mathbf{H} expresa la relación entre el sistema de estado y el vector de medición. También el vector $\mathbf{v}(k)$ tiene la propiedad de ruido blanco Gaussiano de covarianza \mathbf{Q}_2 .

Controlador De Balance: Controlador Difuso PD Mínimo

Para balancear un robot humanoide en el plano frontal, se propone el sistema de control difuso PD mínimo mostrado en la Figura 7, mas detalles en [60-61].

En donde

$$u = G_u(u^*) \quad [20]$$

Las ganancias G_u , G_e y G_r se ajustan manualmente y corresponden respectivamente a las ganancias de la salida, del error y de su derivada, en este caso la salida es la posición para los actuadores de balance. La u^* es la salida del controlador difuso ya defusificada.

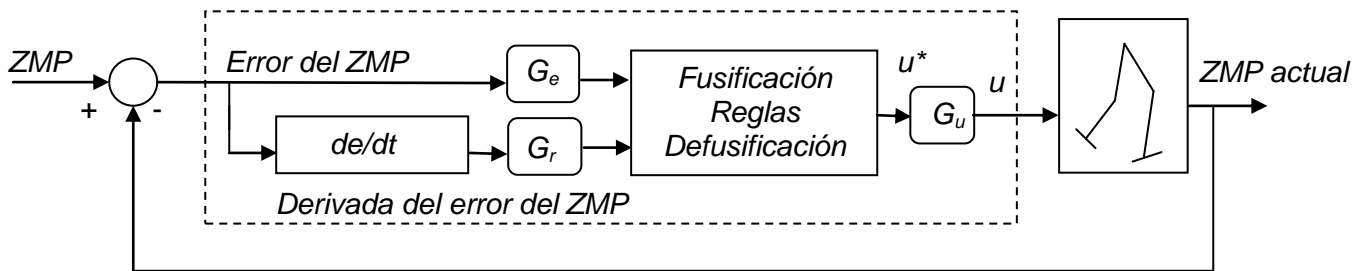


Fig. 7 Esquema de control difuso PD mínimo para el balance de un robot humanoide.

Fusificación.

La Figura 8 a) muestra las funciones de membresía de las entradas, y la figura 8 las de salida tipo singletons.

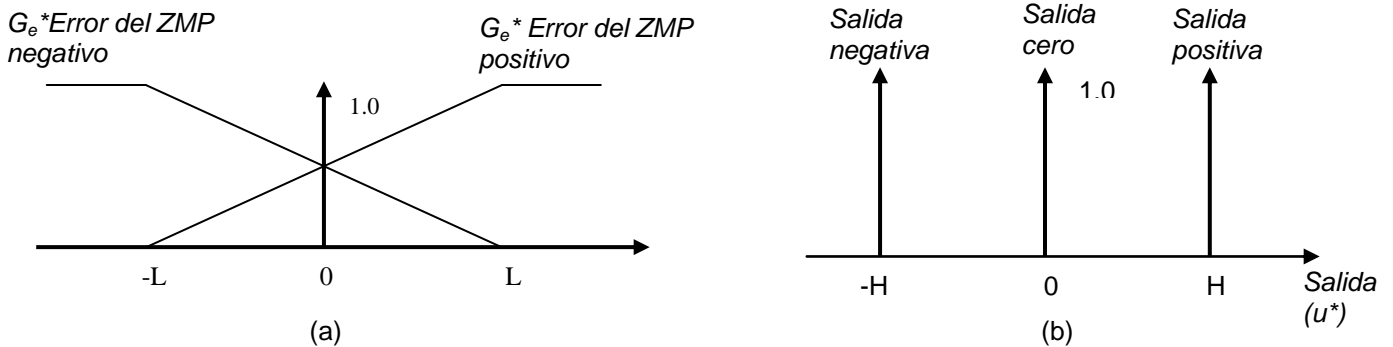


Fig. 8 Conjuntos difusos para las entradas y salida.

Reglas difusas.

Existen cuatro reglas a evaluar en el difuso PD mínimo:

- R1. Si error es **ep** y derivada es **rp** entonces salida es **op**
- R2. Si error es **ep** y derivada es **rn** entonces salida es **oz**

[21]

R3. Si *error* es **en** y *derivada* es **rp** entonces *salida* es **oz**

R4. Si *error* es **en** y *derivada* es **rn** entonces *salida* es **on**

Donde **ep**, significa “error positivo”, **rn** significa “derivada negativa”, **op** significa “salida positiva”, **oz** significa “salida cero” y **on** significa “salida negativa”.

Defusificación.

El método de defusificación utilizado por el algoritmo difuso mínimo, es el del centro de gravedad, que en este caso se expresa en (9).

$$u = \frac{-H(\mu_{R4(x)}) + 0(\mu_{R2(x)} + \mu_{R3(x)}) + H(\mu_{R1(x)})}{\mu_{R4(x)} + (\mu_{R2(x)} + \mu_{R3(x)}) + \mu_{R1(x)}} \quad [22]$$

Fases de caminado

Un ciclo de caminado puede ser dividido en una fase de soporte simple y una fase de doble soporte. Como se muestra en la Figura 9 a) en la fase de soporte simple, un pie soporta el peso del robot, mientras que el otro se mueve en el aire de atrás hacia delante, al mismo tiempo la cintura se mueve con una trayectoria Th (Figura 10). El conocimiento de las fases de caminado, ayudará a facilitar el entendimiento del algoritmo de interpolación cúbica.

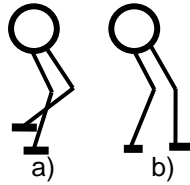


Fig. 9 Fases de caminado, (a) soporte simple, (b) soporte doble.

Algoritmo de Interpolación Cúbica

Es el algoritmo utilizado para la generación de los patrones de caminado para más detalles en [50, 52-54, 56-58] y es calculado como sigue (Figura 10):

1. Para cada paso, la velocidad deseada (v_{xhe}, v_{zhe}) y la longitud del paso L_s son previamente especificadas.
2. El ángulo θ_b es previamente especificado.
3. Las trayectorias para el pie y cintura son generadas por diferentes periodos de caminado, escogiéndose la trayectoria que garantice el criterio del ZMP.

La trayectoria de la cintura se puede generar a través de algoritmos polinómicos de interpolación cúbica, si se conocen los estados iniciales y finales de la fase de soporte simple. En la Figura 10, el estado inicial es definido por x_{hs}, z_{hs} y el estado final es x_{he}, z_{he} . La velocidad inicial es v_{xhs}, v_{zhs} (producida cuando el robot deja la posición inicial). Lo mismo se cumple para la velocidad final v_{xhe}, v_{zhe} (cuando el robot alcanza su posición final).

El estado de las posiciones iniciales y finales para la trayectoria cúbica en z (la dirección $z_h(t)$) se puede expresar como:

$$z_h(t) = \begin{cases} z_{hs} & \text{if } t = kT \\ z_{he} & \text{if } t = kT + T_s \end{cases} \quad [23]$$

donde T es el periodo del paso del robot T_s , de la fase de soporte simple.

$$\dot{z}_h(t) = \begin{cases} v_{zhs} & \text{if } t = kT \\ v_{zhe} & \text{if } t = kT + T_s \end{cases} \quad [24]$$

Implementación en Tiempo Real

Una vez desarrollados y probados los algoritmos metaheurísticos en tiempo real en una PC, para la detección de primitivas geométricas y características (por ejemplo: de esquinas y obtención de líneas horizontales de referencia (ver figura 11)). Entonces se procederá a la implementación de micro cámaras en el robot humanoide, programar los algoritmos metaheurísticos en sistemas de cómputo embebidos al robot, así como a su integración y ajuste con el sistema de locomoción.

Bases humanoides

Este tipo de bases robóticas se han desarrollado principalmente en Japón y Corea, y en general, están compuestas de 16-24 GDL (Grados de libertad); frecuentemente utilizan como actuadores mecanismos servomotores y cuentan con la electrónica básica de control para producir un caminado estático (sin balance), con movimientos bruscos (robotizados) y que por su relativo bajo costo (alrededor de \$2,000 USA DLS) se utilizan frecuentemente como robots de entretenimiento. Sin embargo se pueden incrementar sus capacidades de cómputo mediante ASICs, FPGAs, dispositivos microcontroladores, Pocket PC, Gumstiks, etc., para que en dichas bases se puedan embeber los sistemas de visión artificial y de control. Es muy importante mencionar que los autores de este proyecto cuentan ya con ocho bases de robot humanoide estables de 16 grados de libertad, actuados mediante servomotores y modificadas con electrónica propia y algunas con la adaptación de cámaras prototipo para implementar los sistemas de visión artificial (Figura 2 d). La electrónica, tarjetas adquisidoras, algunas PC de estación y computadoras portátiles, serían adquiridas con fondos de este proyecto.

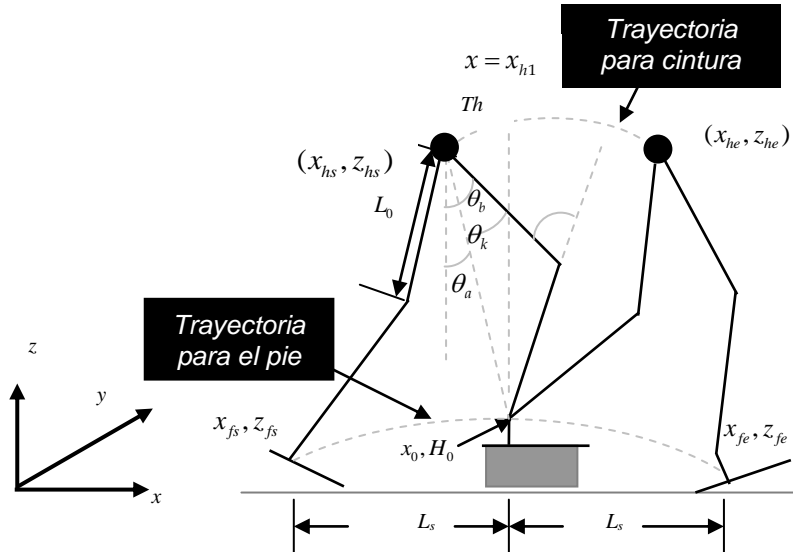


Fig. 10 Trayectorias para la cintura y el pie.

3. OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar un sistema de atención visual mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a robots sociales (figura 1).

Objetivos Particulares.

De acuerdo al esquema que se presenta en la Figura 1, los objetivos particulares son:

implementación de la **atención visual mediante algoritmos metaheurísticos aplicado a robots sociales**, utilizando primitivas geométricas que serán encontradas mediante algoritmos metaheurísticos ejecutados en tiempo real por los recursos de cómputo embebidos al robot.

- a) Proponer algoritmos metaheurísticos nuevos aplicados a la visión artificial aplicados a la identificación de primitivas geométricas que sean utilizadas como referencias para la construcción del proceso de “atención”.
- b) Generar nuevos métodos para el reconocimiento visual del comportamiento de humanos con la finalidad de contribuir al desarrollo de la inteligencia social en un robot.
- c) Implementar en tiempo real los algoritmos metaheurísticos para la detección visual de primitivas geométricas de referencia para la construcción del proceso de “atención”.
- d) Proponer nuevos métodos para que un robot social sea capaz de establecer contacto y seguimiento visual.
- e) Implementar el seguimiento visual de los movimientos de un interlocutor (cara, cuerpo, brazos, manos)
- f) Identificación de las posturas de las personas y determinar posibles estados anímicos.

Para probar dicha hipótesis, el proyecto contempla la creación de prototipos de robots para poner en práctica y experimentar estas propuestas de percepción visual dentro de diversos ambientes con grupos de humanos.

- Desarrollar la simulación, e implementación en tiempo real, sobre una computadora y sobre el sistema de cómputo autónomo del robot social, de los subsistemas siguientes: 1) identificador visual de características geométricas de referencia visual mediante algoritmos metaheurísticos, 2) locomoción del robot sociales mediante el controlador difuso PD mínimo sintonizado.
- Integrar y ajustar el sistema de detección de características geométricas visuales de referencia, con el controlador de balance y de generación de patrones de caminado en un sistema propio de cómputo, para una ejecución autónoma en el robot.
- Ajustar e implementar los patrones de caminado (trayectorias para la cintura y pie, así como para cada GDL (grado de libertad)) de un robot social, mediante el algoritmo de interpolación cúbica.
- Implementar el cálculo en tiempo real del ZMP (inferido a partir de la información visual) mediante el filtro de Kalman en el sistema de cómputo autónomo.
- Diseñar, implementar e integrar la electrónica incluyendo los sistemas de cámaras, la tarjeta autónoma, actuadores y la programación, así como los sistemas de cómputo autónomos para el robot social.

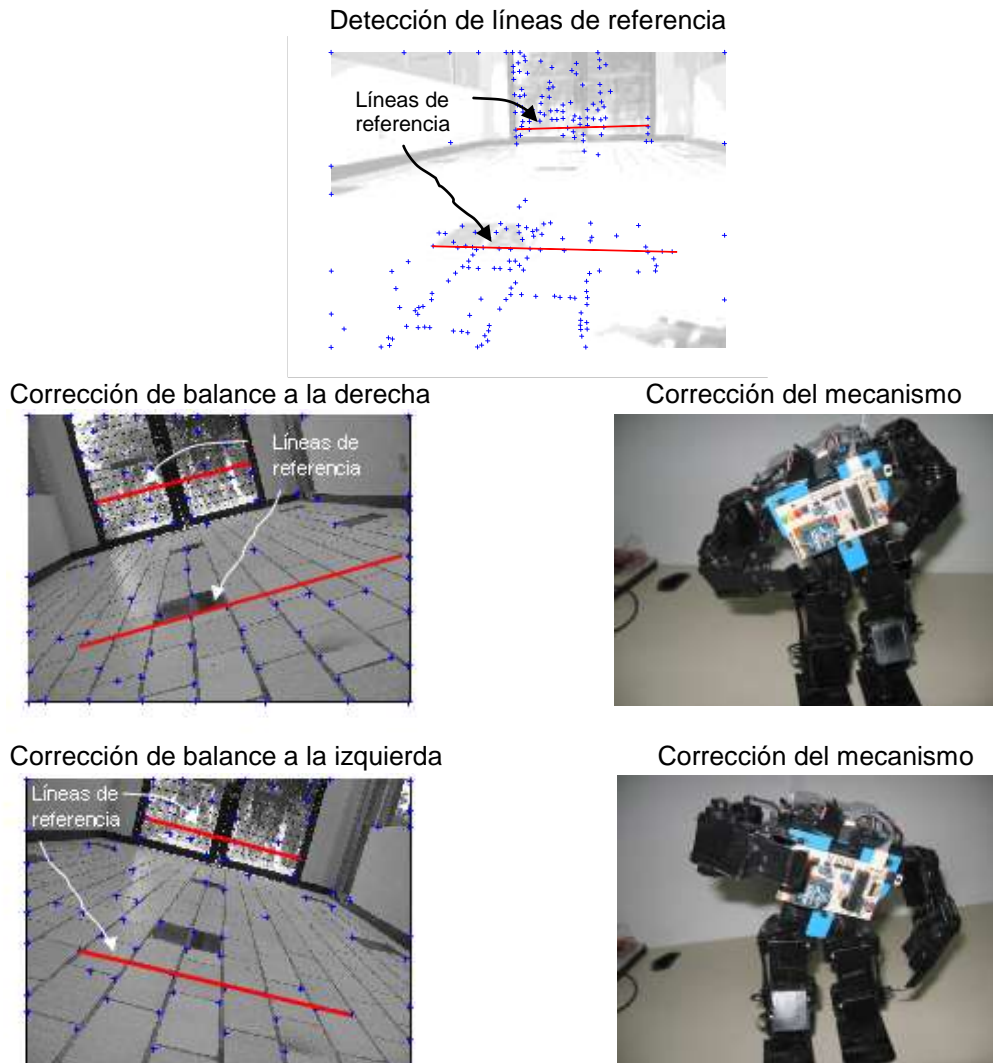


Fig. 11. Detección de esquinas para la generación de características geométricas (líneas horizontales de referencia).

4. METAS

Tomando en cuenta los objetivos del proyecto, las respectivas metas son:

- Contar con un esquema de control de balance basado en un algoritmo metaheurístico para la detección visual en tiempo real de características geométricas de referencia (Figura 1), completamente integrado, ajustado e implementado en un robot social.
- Contar con el ajuste de un algoritmo y un programa computacional, autónomo e integrado al robot social, para el control en tiempo real de la locomoción y cálculo del ZMP mediante el filtro de Kalman.
- Contar con la implementación en tiempo real y en lazo cerrado de un sistema de visión artificial basado en algoritmos metaheurísticos para el control de balance durante el caminado de un robot social.
- Continuar e intensificar las colaboraciones con los grupos de investigación de la Freie Universität Berlin, Alemania, específicamente con el Grupo de Inteligencia artificial y robótica.
- Formar al menos tres generaciones en el diplomado de robótica los cuales se involucren en el proyecto de robots sociales.
- Publicar 4 artículos en revistas internacionales con refereo estricto, y concretar la obtención de un título de patente ante el IMPI.

5. METODOLOGIA

La metodología para el desarrollo de este proyecto está constituida por las dos componentes siguientes:

- Desarrollo de nuevos sistemas de visión artificial basados en algoritmos metaheurísticos para un robot social; esta componente a su vez comprende: 1) Desarrollo de un detector de características geométricas de referencia mediante algoritmos metaheurísticos y su integración con el controlador difuso PD y el filtro de Kalman, 2) Ajuste de la locomoción. Ambas componentes a su vez comprenden: a) Revisión del estado del conocimiento b) Implementación y desarrollo de los algoritmos c) Codificación de los controladores y pruebas a nivel Simulación d) Documentación.
- Implementación en tiempo real del sistemas de visión artificial basado en algoritmos metaheurísticos para un robot social, que requiere de a) Análisis, codificación e integración de los algoritmos metaheurísticos con el controlador difuso PD y el filtro de Kalman, b) Diseño, implementación y pruebas del sistema de visión artificial integrado y ajustado al controlador de balance y del generador de patrones de caminado d) Documentación.

6. GRUPO DE TRABAJO

6.1 Instituciones Nacionales

Grupo de investigación, Robótica y Visión Artificial
Universidad de Azteca de Guadalajara

- Dr. Zaldívar Navarro Daniel, SNI nivel I, responsable técnico del proyecto y quién participará en el desarrollo teórico de los algoritmos metaheurísticos, participará en la escritura de artículos y de un libro.
- Dr. Cuevas Jiménez Erik V, SNI nivel I, quién participará con su experiencia en el desarrollo y ajuste del controlador difuso PD de balance, desarrollará la teoría de los algoritmos metaheurísticos, participará en la escritura de artículos.

6.2 Instituciones Nacionales

Grupo de investigación, Robótica y Visión Artificial
Universidad de Guadalajara

- Dr. Pérez Cisneros Marco A., SNI nivel I, quién colaborará en el desarrollo teórico de los algoritmos metaheurísticos basados en Diferenciación Evolutiva y quién colaborará con el responsable en la escritura de artículos.
- Estudiante de tiempo completo de la maestría en ciencias en ingeniería electrónica y computación, (MIEC), inscrita al PNP de CONACYT, Universidad de Guadalajara, CUCEI, que se encargará del análisis, simulación, validación, generación de experimentos y reporte de resultados para su publicación en revistas de refereo estricto que resulten de la comparación de los algoritmos metaheurísticos: LA, ABC.
- Estudiante de tiempo completo de la maestría en ciencias en ingeniería electrónica y computación, (MIEC), inscrita al PNP de CONACYT, Universidad de Guadalajara, CUCEI, que se encargará del análisis, simulación, validación, generación de experimentos y reporte de resultados para su publicación en revistas de refereo estricto que resulten de la comparación de los algoritmos metaheurísticos: DE, EMO.
- Estudiante de tiempo completo de la maestría en ciencias en ingeniería electrónica y computación, (MIEC), inscrita al PNP de CONACYT, Universidad de Guadalajara, CUCEI, que se encargará del análisis, simulación, validación, generación de experimentos y reporte de resultados para su publicación en revistas de refereo estricto que resulten de la comparación de los algoritmos metaheurísticos: AIS y HS.

- Estudiante de maestría quien implementará en el sistema de cómputo autónomo del robot, la comunicación entre este y una PC externa. Ajustará el cálculo del ZMP, el control difuso PD y la interpolación cúbica (para las últimas tres actividades, se cuenta con algunos resultados positivos y documentados en proyectos similares).
- Alumno de ingeniería en computación, que codificarán e implementarán en los sistemas de visión artificial embebidos a los robots sociales, los algoritmos metaheurísticos LA, ABC, DE, para la identificación de primitivas geométricas en tiempo real.
- Alumno de ingeniería en computación, que codificarán e implementarán en los sistemas de visión artificial embebidos a los robots sociales, los algoritmos metaheurísticos EMO, AIS y HS para la identificación de primitivas geométricas en tiempo real.

6.2 Instituciones Extranjeras

Freie Universitat Berlin, Alemania.

Grupo de Inteligencia artificial y robótica

- Prof. Dr. Rojas González Raúl, SNI nivel III (extranjero), quien participará en desarrollo teórico de los algoritmos metaheurísticos e intercambio de experiencias con el proyecto de robots humanoides de la FU-Berlín. También participará en la escritura de artículos de refereo estricto.

7. INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE

La Unidad de Investigación del Centro Universitario, cuenta con un laboratorio de cómputo, de experimentación, Un primer prototipo de Robot Social (Fig. 2), Robots NXT, biblioteca, impresoras, etc. Aunado a esto la administración de la institución, ofrece los servicios de control financiero y contable, reservación y compra de boletos de transporte, fax y mensajería. Además de la infraestructura disponible en la Unidad de Investigación del Centro Universitario Azteca, el Grupo de investigación de la Universidad de Guadalajara, con el cual se tiene convenio de cooperación, cuenta con un área construida de más de siete mil metros cuadrados, de los cuales alrededor del 500 metros cuadrados están dedicados directamente para la especialidades de Robótica, Control Automático y Visión Artificial. Este cuenta con los siguientes equipos: ocho bases de robot humanoides de 16 GDL, modificadas con controladores y electrónica propia, ver figura 2 d), un prototipo de robot bípedo, así como 10 cámaras web, un brazo manipulador robótico sub-actuado, 2 brazos manipuladores robóticos industriales, quince robots móviles, se cuenta además con 4 computadoras personales y 2 laptops para investigadores y estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado participantes.

En esta área se dispone de 4 oficinas individuales para investigadores, y con dos áreas para estudiantes, con espacio para 10 alumnos, conexión a Internet.

Finalmente, la biblioteca del campus CUCEI (CID), Universidad de Guadalajara, con un área de mil ochocientos metros cuadrados, cuenta con un acervo bibliográfico de 4532 libros, de los cuales aproximadamente el 7% esta relacionado con la robótica y visión artificial. Además, se tiene acceso a todos los servicios ofrecidos por la red de bibliotecas de la Universidad de Guadalajara como: acceso en línea a las revistas publicadas por el IEEE, Springer y por Elsevier, préstamo de libros, búsquedas y adquisiciones de referencias bibliográficas. Ofrece también, en auto-servicio, fotocopiado y escaneo de documentos.

8. RESULTADOS ENTREGABLES

A la finalización del proyecto, se contará con los siguientes productos:

Desarrollo de nuevos sistemas de visión artificial basados en algoritmos metaheurísticos para un robot social, el cual se compone de:

- Un algoritmo de metaheurísticos implementado en un robot social para la detección de primitivas geométricas de referencia visual.
- Un esquema de balance ajustado para un robot social basado en un controlador difuso PD mínimo que utiliza el ZMP como criterio de control.
- Un generador de patrones de caminado ajustado para un robot social, el cual está formado por un algoritmo polinómico de interpolación cúbica.
- Implementación en tiempo real del sistema de visión artificial basado en algoritmos metaheurísticos para el control de balance durante el caminado de un robot social
- Durante el desarrollo del proyecto, ocho artículos en revistas internacionales con refereo estricto.

BIBLIOGRAFIA

[1] Marcel Heerink · Ben Kröse · Vanessa Evers, Bob Wielinga, Assessing Acceptance of Assistive Social Agent Technology by Older Adults: the Almere Model, *Int Journal Social Robot* (2010) 2: 361–375

[2] Hiroshi Ishiguro, Shuichi Nishio, Building artificial humans to understand humans, *J Artif Organs* (2007) 10:133–142

[3] Astrid M. Rosenthal-von der Pütten, Nicole C. Krämer, Christian Becker-Asano, Kohei Ogawa, Shuichi Nishio, Hiroshi Ishiguro, The Uncanny in the Wild. Analysis of Unscripted Human–Android Interaction in the Field, *Int J Soc Robot* (2014) 6:67–83

[4] Shuichi Nishio, Koichi Taura, Hidenobu Sumioka, Hiroshi Ishiguro, Teleoperated Android Robot as Emotion Regulation Media, *Int J Soc Robot* (2013) 5:563–573, springer.

[5] Christian Becker-Asano¹ and Hiroshi Ishiguro, INTERCULTURAL DIFFERENCES IN DECODING FACIAL EXPRESSIONS OF THE ANDROID ROBOT GEMINOID F, *JAISCR*, 2011, Vol.1, No.3, pp. 215-231.

[6] Myagmarbayar Nergui, Yuki Yoshida, Nevrez Imamoglu and Jose Gonzalez, Masashi Sekine, Wenwei Yu, Humand motion tracking and recognition using HMM by a mobile robot, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 1 No. 1, 2013, pp. 76-92, Emerald Group Publishing.

[7] Myagmarbayar Nergui, Yuki Yoshida, Nevrez Imamoglu, Jose Gonzalez, Masashi Sekine and Wenwei Yu , Human motion tracking and recognition using HMM, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 1 No. 1, 2013, pp. 76-92, Emerald Group Publishing Limited.

[8] Gentiane Venture, Hideki Kadone, Tianxiang Zhang, Julie Grèzes, Alain Berthoz, Halim Hicheur, Recognizing Emotions Conveyed by Human Gait, *International Journal of Social Robotics*, November 2014, Volume 6, Issue 4, pp 621-632.

[9] X. Yan, I.A.Kakadiaris, S.K.Shah, Modeling local behavior for predicting social interactions towards human tracking , *PatternRecognition*47(2014)1626–1641.

- [10], Somaya Ben Allouch, Exploring influencing variables for the acceptance of social robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 61, Issue 12, December 2013, Pages 1476–1486
- [12] Zaven Paré, The Art of Being Together with Robots: A Conversation with Professor Hiroshi Ishiguro, *Int J of Soc Robotics* 2014.
- [13] Maria Pateraki a,†, Haris Baltzakis a, Panos Trahanias, Visual estimation of pointed targets for robot guidance via fusion of face pose and hand orientation, *Computer Vision and Image Understanding* 120 (2014) 1–13.
- [14] W. Lu, J.L. Tan, *Detection of incomplete ellipse in images with strong noise by iterative randomized Hough transform (IRHT)*, *Pattern Recognition* 41 (4) , 1268–1279., 2008.
- [15] H.Yuen, J. Princen, J. Illingworth, J. Kittler, *Comparative study of Hough transform methods for circle finding*. *Image Vision Comput.* 8 (1), 71–77., 1990.
- [16] D. Shaked, O. Yaron, N. Kiryati, *Deriving stopping rules for the probabilistic Hough transform by sequential analysis*. *Comput. Vision Image Understanding* 63, 512–526., 1996.
- [17] J.H. Han, L.T. Koczy, T. Poston, *Fuzzy Hough transform*. In: *Proc. 2nd Int. Conf. on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 803–808., 1993.
- [18] T.J. Atherton, D.J. Kerbyson, *Using phase to represent radius in the coherent circle Hough transform*, *Proc, IEE Colloquium on the Hough Transform*, IEE, London., 1993.
- [19] H. Muammar, M. Nixon, *Approaches to extending the Hough transform*. In: *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP_89*, vol. 3, pp. 1556–1559, 1989.
- [20] L. Xu, E. Oja, P. Kultanen, *A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT)*. *Pattern Recognition Lett.* 11 (5), 331–338., 1990.
- [21] S. Dasgupta, S. Das, A. Biswas, A. Abraham, *Automatic circle detection on digital images with an adaptive bacterial foraging algorithm*. *Soft Computing*, DOI 10.1007/s00500-009-0508-z., 2009.
- [22] G. Roth, and M.D. Levine, *Geometric primitive extraction using a genetic algorithm*. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 16 (9), 901–905., 1994.
- [23] E. Lutton, P. Martinez, *A genetic algorithm for the detection 2-D geometric primitives on images*. In: *Proc. of the 12th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 1, 526–528., 1994.
- [24] L. Chih-Chih, *A Novel Image Segmentation Approach Based on Particle Swarm Optimization*, *IEICE Trans. Fundamentals*, 89(1), 324-327, 2006.
- [25] S. Le Hégarat-Masclé, L. Hégarat-Masclé, A. Kallel, X. Descombes, *Ant colony optimization for image regularization based on a nonstationary markov modeling*. *IEEE Trans Image Process* 16(3):865–878, 2007.
- [26] K. Hammouche, M. Diaf, P. Siarry, *A multilevel automatic thresholding method based on a genetic algorithm for a fast image segmentation*. *Computer Vision and Image Understanding*, 109, pp 163-175, 2008.
- [27] A. Baştürk, E. Günay, *Efficient edge detection in digital images using a cellular neural network optimized by differential evolution algorithm*, *Expert System with Applications*, 36(8), 2645-2650, 2009.
- [28] E. V. Cuevas, V. Osuna-Enciso, D. Zaldívar and M. Pérez, **A novel Multi-Threshold segmentation approach based on artificial immune System optimization**, *Advances in Computational Intelligence*, ISBN: 978-3-642-03155-7. Springer-Verlag, 2009.
- [29] [E. V. Cuevas](#), [D. Zaldívar](#) and [M. Pérez-Cisneros](#), *Seeking multi-thresholds for image segmentation with Learning Automata*, *Journal Machine Vision and Applications*, Springer-Verlag, 2010. DOI: 10.1007/s00138-010-0249-0

- [30] E. V. Cuevas, V. Osuna-Enciso, D. Zaldívar and M. Pérez, *A novel multi-threshold segmentation approach based on differential evolution optimization*, Journal Expert Systems with Applications, Elsevier, Volume 37, Issue 7, July, 2010. doi [10.1016/j.eswa.2010.01.013](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.01.013)
- [31] [E. V. Cuevas](#), [D. Zaldivar](#), [M. Pérez-Cisneros](#) and [Marte Ramírez-Ortegón](#), *Circle detection using discrete differential evolution optimization*, Journal [Pattern Analysis & Applications](#), Springer-Verlag, [Volume 14, Number 1](#), Pages 93-107, 2011.
- [32] E. V. Cuevas, D. Oliva, D. Zaldívar, M. Pérez-Cisneros, H. Sossa, *Circle Detection using electro-magnetism optimization*, Journal Information Sciences, Elsevier, Volume 182, Issue: 1, Pages: 40-55, 2011.
- [33] E. V. Cuevas, V. Osuna-Enciso, D. Zaldívar and M. Pérez, *Circle Detection on Images based on Artificial Immune System Optimization*, Aceptado en: Journal of Algorithms in Cognition, Informatics and Logic, enero, 2011.
- [34] E. V. Cuevas, Diego Oliva, D. Zaldívar, M. Pérez-Cisneros, *Detección de primitivas circulares usando un algoritmo inspirado en el electromagnetismo*, Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. XII, Núm. 4, 469-485, 2011.
- [35] E. V. Cuevas, V. Osuna-Enciso, D. Zaldívar and M. Pérez, *Segmentación y detección de glóbulos blancos en imágenes usando sistemas inmunes artificiales*, Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, Vol. XXXI, Núm. 2, 119 - 134, 2010.
- [36] E. V. Cuevas, N. Ortega-Sánchez, D. Zaldivar and M. Pérez-Cisneros. Circle Detection by Harmony Search Optimization. Journal of Intelligent & Robotic Systems DOI: 10.1007/s10846-011-9611-3, 2011.
- [37] E. V. Cuevas, F. Sención-Echauri, D. Zaldivar and M. Pérez-Cisneros. Multi-circle detection on images using artificial bee colony (ABC) optimization. Soft Computing DOI: 10.1007/s00500-011-0741-0. 2011.
- [38] E. V. Cuevas, F. Sención-Echauri, D. Zaldivar, M. Pérez-Cisneros, H. Sossa, A multithreshold segmentation approach based on ABC. Applied Intelligence, DOI: 10.1007/s10489-011-0330-z, 2012.
- [39] E. V. Cuevas, V. Osuna-Enciso, Fernando Wario, Daniel Zaldívar, Marco Pérez-Cisneros. Automatic multiple circle detection based on artificial immune Systems. Aceptado en: Expert Systems with Applications.
- [40] E. V. Cuevas, F. Wario, D. Zaldívar, M. Pérez-Cisneros. Circle detection on images using Learning Automata. Aceptado en: IET Computer Vision.
- [41] E. V. Cuevas, M. Gonzalez, D. Zaldivar, M. Perez and G. Torales An algorithm for global optimization inspired by collective animal behavior, Journal Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2012, Article ID 638275, 24 pages
- [42] E. V. Cuevas, D. Zaldívar and M. Pérez, ***LVQ neural Networks Applied to Face Segmentation***, AUTOSOFT Intelligent Automation & Soft Computing, Vol. 15, No. 3, pp. 439-450, 2009.
- [43] E. V. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, ***Neurofuzzy prediction for gaze control***, Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, ISSN: 0840-8688, 2009.
- [44] E. V. Cuevas, D. Zaldivar, M. Pérez-Cisneros, *Procesamiento Digital de Imágenes con Matlab y Simulink*, Editorial Alfaomega, ISBN: 9786077070306, 2010.
- [45] E. V. Cuevas, D. Zaldivar, M. Pérez-Cisneros, E. Sánchez and M. Ramírez-Ortegón, *Robust Fuzzy Corner Detector*, Intelligent Automation and Soft Computing, 2010, Accepted.
- [46] H. Sossa, E. V. Cuevas, D. Zaldívar, [On the Computation of the Euler Number of a Binary Image Composed of Hexagonal Cells](#), JOURNAL OF APPLIED RESEARCH AND TECHNOLOGY, Volume 8, issue 3, 2011. Accepted.
- [47] E. Cuevas, D. Zaldívar, R. Rojas, *Intelligent active vision systems for robots*, 1ra ed., Cuvillier Verlag Gottingen, Alemania, 2007.
- [48] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Particle filter in vision tracking* Revista electronica e-Gnosis, vol 5., 2007.

- [49] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **Artificial Vision: Color fuzzy segmentation**, Congress on Computer Sciences, Biomedical Engineering and Electronics, CONCIBE 2006.
- [50] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Filtering for vision tracking*, Revista electronica e-Gnosis, vol 4., 2006.
- [51] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **Robust fuzzy segmentation**, Congress on Computer Sciences, Biomedical Engineering and Electronics CONCIBE 2005.
- [52] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **Vision tracking prediction**, Congress on Computer Sciences, Biomedical Engineering and Electronics CONCIBE 2005.
- [53] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Kalman filter for vision tracking*, Technical Report B 05-12, Freie Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik, 2004.
- [54] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Competitive Neural Networks Applied to Face Localization*, Technical Report B 13-03, Freie Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik, 2004.
- [55] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **LVQ color segmentation applied to face localization**, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, IEEE, ICEEE, 142-146, DOI.10.1109/ICEEE.2004.1433865, 2004.
- [56] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **Neurofuzzy prediction for visual tracking**, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, IEEE, ICEEE, 157-161, DOI. 10.1109/ICEEE.2004.1433868, 2004.
- [57] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, **Fuzzy segmentation in image processing**, International Congress on Electrical Engineering, ELECTRO 2004.
- [58] E. Cuevas, D. Zaldivar, Marco Pérez-Cisneros, and Marte Ramírez-Ortegón, **Polynomial trajectory algorithm for a biped robot**, International Journal of Robotics and Automation, 2010. DOI: [10.2316/Journal.206.2010.4.206-3240](https://doi.org/10.2316/Journal.206.2010.4.206-3240).
- [59] D. Zaldivar, E. Cuevas, MA Pérez, Título de patente otorgada: *Robot Modular Caminante*, Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI), expediente de patente MX/a/2007/000993, noviembre 2009.
- [60] D. Zaldivar, E. Cuevas, and R. Rojas, *Design Humanoid Robotics*, 1st ed., Cuvillier Verlag Göttingen, Germany, 2007.
- [61] E. Cuevas, D. Zaldivar, E. Tapia and R. Rojas, *An Incremental Fuzzy Algorithm for The Balance of Humanoid Robots*, Book: *Humanoid Robots, New Developments*, Advanced Robotics Systems International and I-Tech, Verlag, Viena, Austria, pp. 171-184, 2007.
- [62] D. Zaldivar, *A biped Robot Design*, PhD Thesis, Freie Universitat Berlin, 2006.
- [63] D. Zaldivar, E. Cuevas, M. A. Pérez and R. Rojas, *Neural network model for the Balance of a Biped Robot*, Journal "Research in Computing Science, Vol. 21., pp. 141-150, 2006.
- [64] E. Cuevas, D. Zaldivar and R. Rojas, **Incremental Fuzzy Control for a Biped Robot Balance**
Proceedings RA 2005, pp. 7-12, Cambridge, USA., 2005.
- [65] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Dynamic control algorithm for a biped robot*, *Proceedings CA 2005*, pp. 70-75, Cancún, México, 2005.
- [66] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Walking trajectory control for a biped robot*, Technical Report B 04-18, Freie Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik, 2004.
- [67] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, *Bipedal robot description*, Technical Report B 04-19, Freie Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik, 2004.
- [68] D. Zaldivar, E. Cuevas, *Desarrollo de controladores difusos, enfocado a microcontroladores PIC*, 1ra ed., Cuvillier Verlag, Göttingen, Alemania, 2006.
- [69] F. Lara, E. Sánchez, D. Zaldivar, *Minimal fuzzy microcontroller implementation for didactic applications*, Journal of Applied Research and Technology, Vol.1 No. 2, July 2003.
- [70] D. Karaboga, B. Akay. *A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm*. Applied Mathematics and Computation 214 (2009) 108-132.

