

Interacción humano-robot: Navegación socialmente aceptable

Daniel Herrera¹, Javier Gimenez¹, Flavio Roberti¹, Ricardo Carelli¹ y Fernando Auat²

¹Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan-CONICET, Av. Libertador Oeste 1109, San Juan-Argentina

²Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Av. España 1680, Valparaíso, Chile
{dherrera, jgimenez, froberti, rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar, fernando.auat@usm.cl²

Resumen- Se propone un algoritmo de navegación que considera la postura del robot y del humano para sintetizar una técnica de evasión de obstáculos aplicable a navegación social. Un robot en presencia de humanos no debe únicamente realizar técnicas de evasión que garanticen “seguridad física”, sino considerar que el humano presenta un comportamiento donde su “sensación de seguridad” es determinante. Para afrontar este problema se propone un algoritmo de tipo descentralizado, reactivo y proactivo, que considera técnicas de proyección de movimiento basadas en movimiento lineal uniforme, formas “socialmente aceptables”, variación dinámica de dimensiones, y consideraciones oclófóbicas; que generan intencionalidad y le posibilitan ser utilizado como técnica de evasión de humanos.

Palabras clave – Interacción humano-robot, proyección movimiento, socialmente aceptable, evasión obstáculos dinámicos.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de interacción Humano-Robot se habla de un enfoque totalmente nuevo en temas de planeación y control, donde los humanos son explícitamente tomados en cuenta. Individuos de comportamiento absolutamente dinámico, que adaptan sus acciones y preferencias dependiendo del medio y particularmente de los miembros con los que interactúe. Por tanto, se debe tomar en cuenta que características tan complejas como la personalidad y la evolución dinámica de su comportamiento son de gran importancia en el diseño de distintas aplicaciones de interacción. Criterios como la “seguridad física”, “sensación de seguridad”, “movimientos socialmente aceptables” y “distancias sociales” son los que llevan a analizar de manera conceptual parámetros intrínsecos de diseño, que de manera directa o indirecta deberían ser considerados.

Dentro del ámbito de la locomoción en ambientes semiestructurados se establecen “criterios de seguridad” y “visibilidad”. Todo relacionado con características de confort para el humano; establecidas por su accesibilidad, campo de visión y sus preferencias en cuanto a ubicación y movimiento relativo humano-robot. Además es importante considerar que todo esto debe ser tanto en presencia como en sinergia (cooperación) con humanos. Desde el punto de vista de decisiones de movimiento el robot debe asegurar [1]:

- Movimiento seguro (no lastimar al humano),
- Movimiento fiable y efectivo,
- Movimiento socialmente aceptable (tomar en cuenta el modelo del humano, así como sus preferencias y necesidades).

En este punto es necesario formular ciertas preguntas como por ejemplo: “¿cómo debería colocarse el robot relativo al

humano?”, “¿Cómo debería aproximarse a él?”, “¿Cómo entregaría objetos a un humano?” o “¿Cómo moverse en un medio ambiente relativamente restringido en presencia de humanos?”. Por tanto es indispensable tomar en cuenta “restricciones sociales” y sintetizar movimientos y planeación compatible con las preferencias de los humanos, aceptable por humanos y fácilmente reconocible en términos de “intención”.

En lo referente a “sensación de seguridad”, es importante notar que dentro de las relaciones cotidianas entre humanos existen reglas no escritas, como las referentes a la distancia entre dos personas cuando interactúan. Uno de los trabajos representativos en el tema, es el relacionado a “Proxémica” de Edward T. Hall [2], para describir las distancias medibles entre las personas mientras éstas interactúan entre sí. Percibir dichas distancias mejora el entendimiento intercultural, y ayudan a eliminar la incomodidad que la gente pueda sentir. Adicionalmente, las distancias personales también dependen de la situación social, el género, y la preferencia individual. El robot debería cumplir de cierta manera convenciones similares, si bien es claro que no serían idénticas, se puede llegar a distinguir distancias sociales para este tipo de interacción.

Un segundo reto clave es sin duda la capacidad de los robots para adaptarse y aprender de los humanos. Para esto los robots necesitan [3]:

- Aprender dinámicamente como interpretar y entender comportamientos multi-modo de humanos. Caracterizar propiedades de interacción o aprender a interpretar la “intención”;
- Usar aprendizaje por imitación o por demostración, lo cual involucra alta capacidad para decodificar señales lingüísticas y no-lingüísticas.

Es así que las representaciones de acciones humanas permiten no solamente inferir la estructura combinatoria de sus movimientos complejos, sino también reproducirlos y generar movimientos “socialmente aceptables”.

Este trabajo se enfoca en el concepto de navegación amigable propuesto en [4], donde se concibe un tipo de navegación local, descentralizada, que presenta la misma heurística de navegación utilizada por los humanos, que manifiesta en cierta manera la “intencionalidad” de sus movimientos y a la vez identifica de manera reactiva y proactiva el movimiento de otros individuos, bajo el supuesto que cada uno efectúa un movimiento lineal uniforme al momento de la percepción. De esta manera el robot será capaz de construir a cada instante una “curva de colisión” basándose en movimientos proyectados de cada uno de los individuos en la dirección y velocidad presentes para predecir distancias de

colisión dentro de un rango de direcciones posibles del robot. Esta información permitirá modificar su dirección dinámicamente asegurando siempre zonas sin colisión. Dentro de esto se presenta como aporte un algoritmo para generar la “curva de colisión”, el cual exhibe una metodología basada en resolución de sistemas de ecuaciones mediante métodos iterativos, que optimiza el tiempo de generación de la misma (sección II.B).

Otra contribución de este trabajo se presenta al unificar criterios y metodologías propuestas por varios autores, como son las zonas sociales tipo elipse para los humanos ([5, 6]), que brindan “sensación de seguridad” al humano, pues garantizan un amplio y largo espacio durante su locomoción. Además de considerar dimensiones dinámicas de dicha zona ([4, 5]), con dos propósitos fundamentales: por un lado evitar la formación de “dead-locks” cuando el espacio es insuficiente, y por otro generar “espacio libre para transitar” proporcional a su velocidad, cuando el humano está en movimiento (sección II.A). Todo enmarcado en el tipo de navegación amigable antes mencionada [4], pero generalizada como técnica de evasión (sección III).

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Una vez enmarcado el panorama, se consolidan ideas establecidas por varios autores dentro del contexto de navegación amigable [4-7], que permiten garantizar tres conceptos importantes de la navegación socialmente aceptable: 1) zonas sociales y espacio libre para transitar (forma y dimensión de la elipse), 2) intencionalidad (al proyectar movimientos y anticipar colisiones), 3) comportamiento oclofóbico (al modificar las dimensiones de zona social acorde al espacio disponible para transitar).

A. Modelado de la zona social humana

Basado en lo antes mencionado se modela el espacio personal durante el movimiento humano para cada instante de tiempo t como una elipse, cuyos semiejes mayor “ a ” y menor “ b ” son considerados funciones de la distancia y de la velocidad relativa respecto al robot (ver Fig. 1). Si v_H y v_R son las velocidades del humano y del robot, se tiene que:

$$a = f_a(v_{H/R}) \text{ y } b = f_b(d_{HR}) \quad (2)$$

$$v_{H/R} = v_H - v_R, \quad d_{HR} = \sqrt{(x_R - x_H)^2 + (y_R - y_H)^2}$$

donde (x_R, y_R, φ_R) y (x_H, y_H, φ_H) identifican las posturas del robot y del humano respectivamente. Los límites $v_{MÁX}$, v_{MIN} , $d_{MÁX}$, d_{MIN} vienen determinados por distancias sociales y perfiles de velocidad obtenidos mediante experimentación, considerando el confort para el humano como factor determinante. Sin embargo cabe notar que $a_{MIN}=b$ y v_{MIN} es nula, pues en reposo se considera una zona social de forma circular. Además b_{MIN} y $b_{MÁX}$ representan la zona de seguridad y zona de confort social respectivamente, cuyas distancias sociales han sido presentadas por varios autores, tanto en interacción entre humanos [2], como para interacción humano-robot [8]. Sin embargo es claro que quedan determinadas por el tipo de aplicación, interacción e inclusive la morfología propia del robot.

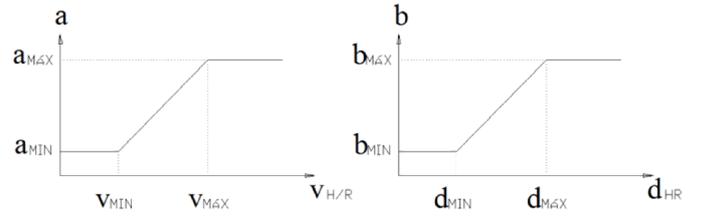


Fig. 1 Funciones de semieje mayor y menor.

B. Algoritmo de generación de “curva de colisión”

Supongamos para cada instante que el robot y el humano tienen posturas (x_R, y_R, φ_R) y (x_H, y_H, φ_H) , y velocidades v_R y v_H , respectivamente. Se busca determinar para distintas direcciones del robot, alrededor de φ_R , los tiempos de colisión mínimos en cada una de estas direcciones, considerando que tanto el robot, como el humano, realizan un movimiento lineal uniforme.

Para esto se considera al robot y al humano moviéndose linealmente por un entorno bidimensional plano. Entonces en un instante $t \geq 0$, la ubicación proyectada de los mismos es $(x_{PR}(t), y_{PR}(t))$ y $(x_{PH}(t), y_{PH}(t))$, donde $x_{PR}(t) = v_{Rx}t + x_R$, $y_{PR}(t) = v_{Ry}t + y_R$, $x_{PH}(t) = v_{Hx}t + x_H$ y $y_{PH}(t) = v_{Hy}t + y_H$, siendo:

$$v_{Rx} = v_R \cos(\Omega + \varphi_R), \quad v_{Ry} = v_R \sin(\Omega + \varphi_R),$$

$$v_{Hx} = v_H \cos(\varphi_H), \quad v_{Hy} = v_H \sin(\varphi_H),$$

donde v_H y v_R representan las velocidades del humano y del robot, y v_{Hx} , v_{Hy} , v_{Rx} y v_{Ry} sus componentes en “x” e “y” dentro de su entorno de proyección virtual respectivamente, y, Ω define las distintas desviaciones posibles en su rango de visión, lo cual se detallará más adelante.

Asuma además que el radio de acción del robot es una circunferencia de radio r , y el del humano es una elipse con ejes mayor y menor de longitudes a y b , respectivamente, rotada de acuerdo a la dirección de su movimiento φ_H . Se desea determinar (en caso de existir) el instante de tiempo mínimo y positivo en el que se interceptan los radios de acción del robot y del humano, y las coordenadas físicas exactas en donde se produce esta situación.

Para abordar este problema matemáticamente, se trabaja en un espacio tridimensional (x, y, t) , graficando en cada plano $t = t^* \geq 0$, los radios de acción del robot y del humano, en el tiempo t^* . De este modo queda graficada la parte superior ($t \geq 0$) de los cilindros elípticos (ver Fig. 2) correspondientes a las ecuaciones:

$$(x - x_{PR}(t))^2 + (y - y_{PR}(t))^2 = r^2, \quad (3)$$

$$A(x - x_{PH}(t))^2 + B(y - y_{PH}(t))^2 + C(x - x_{PH}(t))(y - y_{PH}(t)) = 1, \quad (4)$$

donde,

$$A = \frac{\cos^2(\varphi_H)}{a^2} + \frac{\sin^2(\varphi_H)}{b^2}, \quad B = \frac{\sin^2(\varphi_H)}{a^2} + \frac{\cos^2(\varphi_H)}{b^2} \quad \text{y}$$

$$C = \sin(2\varphi_H) \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right).$$

Estos cilindros pueden no intersectarse, intersectarse en un único punto o intersectarse en infinitos puntos. Supongamos por el momento que existe alguna solución, y que se está

interesado en identificar aquella en la que t es mínimo y positivo.

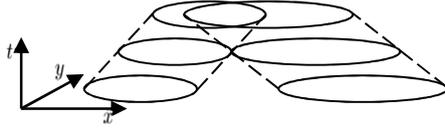


Fig. 2 Diagrama de los cilindros elípticos que representan el movimiento de los radios de influencia del robot y el humano.

Esta solución (x_0, y_0, t_0) es única y tiene la particularidad de que trabajando sobre el plano $t=t_0$, las rectas tangentes a la circunferencia y a la elipse en el punto (x_0, y_0) coinciden. En caso de haber infinitas soluciones de (3) y (4), las mismas se encuentran abarcadas en un intervalo de tiempo $[t_0, t_1]$. Si $t_2 \in (t_0, t_1)$ entonces las curvas de nivel sobre el plano $t = t_2$ se intersectan en dos puntos, en los cuales las rectas tangentes a ambas cónicas no coinciden. Sin embargo, sobre el plano $t = t_1$ se repite la particularidad mencionada sobre el plano $t = t_0$. La Fig. 3 diagrama tal particularidad. Esto implica que si se agrega la restricción de igualdad de rectas tangentes, la cardinalidad del conjunto de ternas de solución será a lo sumo 2. Como las mencionadas rectas tangentes pasan por un mismo punto, alcanza con pedir que las pendientes de las mismas sean iguales.

Teniendo en cuenta que la pendiente de la recta tangente a una elipse centrada de ecuación genérica $Ax+By+Cxy=1$ sobre el punto (x_0, y_0) , es:

$$m = -\frac{2Ax_0 + Cy_0}{2By_0 + Cx_0}.$$

Entonces la restricción de tangentes coincidentes se reduce a:

$$\frac{x - x_{PR}(t)}{y - y_{PR}(t)} = -\frac{2A(x - x_{PH}(t)) + C(y - y_{PH}(t))}{2B(y - y_{PH}(t)) + C(x - x_{PH}(t))},$$

o equivalentemente, evitando singularidades,

$$2B(x - x_{PR}(t))(y - y_{PH}(t)) + C(x - x_{PR}(t))(x - x_{PH}(t)) - 2A(x - x_{PH}(t))(y - y_{PR}(t)) - C(y - y_{PR}(t))(y - y_{PH}(t)) = 0.$$

De este modo se cuenta con el siguiente sistema de tres ecuaciones cuadráticas con tres incógnitas, y con a lo sumo 2 soluciones:

$$\begin{cases} F_1(x, y, t) = 0 \\ F_2(x, y, t) = 0 \\ F_3(x, y, t) = 0 \end{cases}, \text{ donde,} \quad (5)$$

$$F_1(x, y, t) = (x - x_{PR}(t))^2 + (y - y_{PR}(t))^2 - r^2,$$

$$F_2(x, y, t) = A(x - x_{PH}(t))^2 + B(y - y_{PH}(t))^2 + C(x - x_{PH}(t))(y - y_{PH}(t)) - 1,$$

$$F_3(x, y, t) = 2B(x - x_{PR}(t))(y - y_{PH}(t)) + C(x - x_{PR}(t))(x - x_{PH}(t)) - 2A(x - x_{PH}(t))(y - y_{PR}(t)) - C(y - y_{PR}(t))(y - y_{PH}(t)).$$

Este sistema puede ser resuelto numéricamente por medio del método iterativo de Newton-Raphson, utilizando a $((x_R+x_H)/2, (y_R+y_H)/2, -t_{m\acute{a}x})$ como punto de inicio, y con una cantidad fija de iteraciones máximas. Si el algoritmo no convergió, se asume que el sistema no tiene solución. El inicio propuesto con $t = -t_{m\acute{a}x}$ asegura que si el sistema tiene alguna solución con $t < 0$, entonces converja a ella. Esto permite

identificar y desechar las situaciones en las cuales las zonas de influencia se interceptan en $t = 0$ (en este momento), o cuando se alejan mutuamente. Además, si el algoritmo converge a una solución con $t > 0$, lo hará a la solución con tiempo mínimo, tal y como se desea.

En cada instante el robot resuelve este sistema proyectando su trayectoria en K direcciones frontales equidistantes. Esto lo lleva a resolver K sistemas por vez, lo cual puede optimizarse si existiese algún procedimiento capaz de identificar a priori la posibilidad de colisión en alguna dirección. En caso de obtener una respuesta negativa, no se resuelven los K sistemas en ese instante, y se pasa al próximo periodo de muestreo.

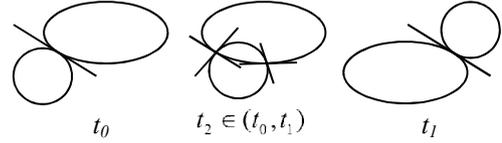


Fig. 3 Diagrama del comportamiento de las rectas tangentes en las intersecciones de las zonas sociales.

Como se puede observar en la Fig. 4, el conjunto de circunferencias proyectadas en cada tiempo $t=t_n$, en un continuo de direcciones respecto al robot conforma una circunferencia de centro (x_R, y_R) y radio $r(t) = r + v_R t$.

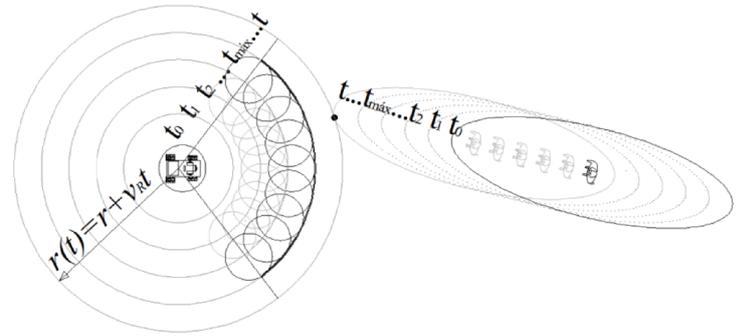


Fig. 4 Diagrama del procedimiento optimizador utilizado.

Teniendo esto en cuenta, se propone un procedimiento optimizador que se basa en la resolución a priori del sistema:

$$\begin{cases} F_1^*(x, y, t) = 0 \\ F_2(x, y, t) = 0 \\ F_3(x, y, t) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

donde las funciones F_2 y F_3 son las mismas que se utilizaron en el sistema (5), y cumplen los mismos objetivos mencionados anteriormente y F_1^* viene dado por:

$$F_1^*(x, y, t) = (x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 - r(t)^2.$$

Esta función posee curvas de nivel circulares para cada $t > 0$, con radios crecientes a medida que crece t (ver Fig. 4).

Si bien el sistema (6) no estima el tiempo de colisión en todas las direcciones, pronostica la dirección en la que se producirá la colisión en menor tiempo $t = t_n$.

Este objetivo se logra por medio del siguiente procedimiento: si la circunferencia y la elipse se encuentran intersectadas en $t=0$, se detiene al robot hasta dar un estado sin colisión. Caso contrario, se resuelve numéricamente el sistema (6), con $((x_R+x_H)/2, (y_R+y_H)/2, 0)$ como punto de inicio, y con

una cantidad fija de iteraciones máximas. Debido a que el sistema (6) siempre tendrá solución, el método de Newton-Raphson converge con t mínimo. Si $t < 0$ o si $t > t_{max}$ se interpreta que el robot no colisionara, por haber dejado atrás al humano o por encontrarse apartado de él una distancia máxima de proyección preestablecida, a partir de la cual no se proyecta la colisión. En este caso, no es necesario resolver el sistema (5). Si $0 \leq t \leq t_{max}$, se interpreta que el robot puede colisionar, y por ende se resuelve el sistema (5) para brindarle información detallada en cada uno de los ángulos de acción, generando así la curva de colisión solo en los casos necesarios.

III. NAVEGACIÓN SOCIAL

A. Modelo basado en comportamiento para locomoción humana.

Esta sección resume el modelo de comportamiento humano, basado en los resultados obtenidos en la sección anterior. A diferencia del método propuesto en [4], [9] y [10] se propone un método no enmarcado en el contexto de un robot alcanzando un objetivo, ya que se considera que en interacción humano-robot, pueden existir actividades multi-modo y probablemente ambientes no-estructurados, que requieren de una herramienta más versátil, y adaptable a diversas técnicas de control y actividades que realice el robot. Es así que se generaliza el método, de manera que pueda ser utilizado como un método de evasión de obstáculos tanto estáticos como dinámicos. La manera como el robot identifica los individuos en el entorno y logra estimar sus posiciones y velocidades va más allá del alcance de este trabajo.

Para direccionar sus movimientos, el robot hace uso de una función cognitiva $f(\Omega)$, $\Omega \in [-\pi/2 + \delta, \pi/2 - \delta]$, nombrada “curva de colisión”, generada en base a su información sensorial y a la proyección de movimientos, tal y como se vio en la sección anterior. Que, esencialmente presenta para cada ángulo de visión Ω , el tiempo antes de colisionar con un obstáculo visible basándose en proyecciones lineales (ver Fig. 5).

Para este estudio se modula la dirección del robot, haciendo una analogía entre evasión de colisión basada en fuerzas ficticias (control de impedancia, para obstáculos estáticos) [11] y el método planteado (extensible a obstáculos dinámicos incluyendo humanos).

De esta forma se debe garantizar por una parte, direccionar al robot hacia una zona sin colisión, y por otra buscar que el ángulo sea lo más cercano a la dirección del robot, es decir, produzca la menor desviación posible (ver Fig. 5).

Es así que tomando como referencia 0 la dirección misma del robot, se procede de la siguiente manera:

- i) Verificar ausencia de colisión en la desviación 0, si el caso es afirmativo, guardar $\Omega_d = 0$ y saltar a iii). (ver “ t_1 ” y “ t_4 ”, en Fig. 6)
- ii) Verificar ausencia de colisión en desviación 0 más incremento hacia la izquierda y derecha, si hay un caso afirmativo, guardar Ω_d y saltar a iii). Caso contrario incrementar nuevamente la desviación hasta encontrar un caso afirmativo. (ver “ t_2 ” y “ t_3 ”, en Fig. 6)

iii) Rotar la velocidad de referencia del robot.

B. Evasión de obstáculos dinámicos tipo humano

Una vez propuesta la técnica de desviación en el apartado anterior, su incorporación en cualquier controlador resultaría por la rotación del vector velocidad deseada, como sigue [11]:

$$\mathbf{v}_{d_{\text{SIN COLISIÓN}}} = \begin{bmatrix} \cos \Omega_d & -\sin \Omega_d \\ \sin \Omega_d & \cos \Omega_d \end{bmatrix} \mathbf{v}_d \quad (7)$$

Donde Ω_d es la desviación hacia una zona sin colisión.

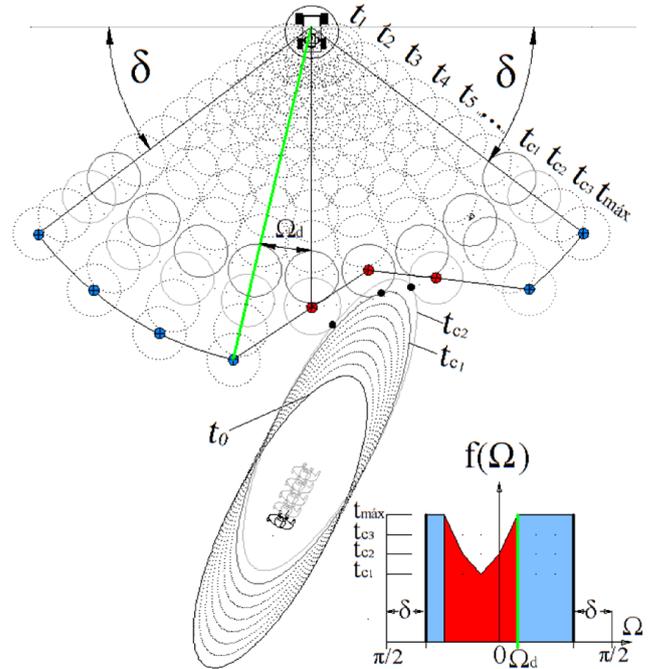


Fig. 5 Representación gráfica de la generación de la “curva de colisión”.

IV. SIMULACIONES

A. Simulación 1: Seguimiento de Trayectoria

Se presenta la técnica de evasión propuesta para el problema de seguimiento de trayectoria, en un panorama tipo corredor, donde dos individuos (robot y humano) se acercan. Se considera que el humano no realiza ninguna acción evasiva e incrementa su velocidad a una tasa constante, por lo cual el robot debe ser el encargado de modificar su dirección para evitar la colisión.

El robot utilizado es del tipo Car-like, considerando su modelo cinemático simple, tal como el propuesto en [12]. Se utiliza además un control para seguimiento de trayectoria como el propuesto en [11]:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{ref.Robot}} = \dot{\mathbf{X}}_d + \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{X}})\tilde{\mathbf{X}} = v_{\text{ref}} \angle \phi_{\text{ref}}$$

$$\text{donde, } \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}_{\text{robot}}$$

$$\mathbf{X}_d = [x_d \ y_d] = \text{Posición deseada sobre la trayectoria}$$

$$\mathbf{X}_{\text{robot}} = [x_R \ y_R] = \text{Posición actual del robot}$$

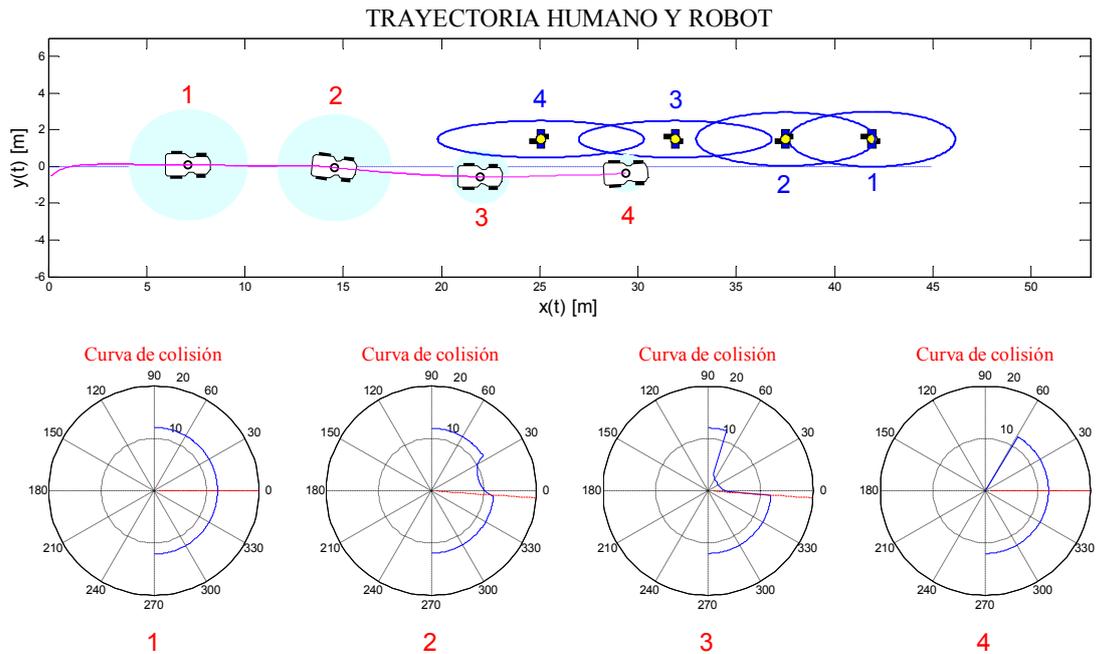


Fig. 6 Trayectoria del humano y del robot. Curvas de colisión para distintos instantes. Se grafica al robot y al humano, junto con las correspondientes curvas de colisión en cuatro instantes de tiempo distintos.

donde se considera que la rotación de dicho vector de referencia viene dada en función de (7), siendo $\mathbf{v}_d = \dot{\mathbf{X}}_{\text{ref.Robot}}$ y Ω_d la desviación generada por la técnica de evasión propuesta.

Los resultados obtenidos se muestran en las Fig. 6 y 7. Es interesante notar en la Fig. 6 la deformación que se produce en la zona social de acuerdo a la distancia y velocidad relativa entre ambos individuos, que a su vez repercute directamente en la forma de la curva de colisión proyectada por el robot. De esta forma se genera una desviación de la velocidad de referencia de manera anticipada, dando “sensación de seguridad” al individuo y garantizando un espacio libre para transitar, además de evitar totalmente invadir la zona social del mismo (“seguridad física”). En la Fig. 7 se muestran las acciones de control del robot en términos de ángulo de dirección de las ruedas delanteras y velocidad lineal, como es usual en los vehículos del tipo car-like.

Sin embargo esta simulación se basa en el supuesto que el individuo no efectúa ninguna acción evasiva, lo cual sabemos que acorde al comportamiento humano no es del todo cierto, pues el humano efectuaría una desviación semejante a la observada en nuestros resultados para el robot.

B. Simulación 2: Control de postura

De manera análoga se incorpora el método de evasión presentado, pero ahora basados en el control de postura propuesto por [13] y el robot tipo “car-like”.

Los resultados obtenidos se muestran en las Fig. 8 y 9. En la Fig. 8 se nota claramente la desviación generada por el método propuesto, donde el vector en rojo, identifica el ángulo deseado, que direcciona al robot a una zona sin colisión; que además de generar una adecuada anticipación en sus

movimientos, evita interferir en el área de tránsito libre del humano. Es importante observar que los movimientos garantizan también “seguridad física”, pues no existe mayor solapamiento de las áreas sociales. En la Fig. 9 se muestran las acciones de control del robot en términos de ángulo de dirección de las ruedas delanteras y velocidad lineal.

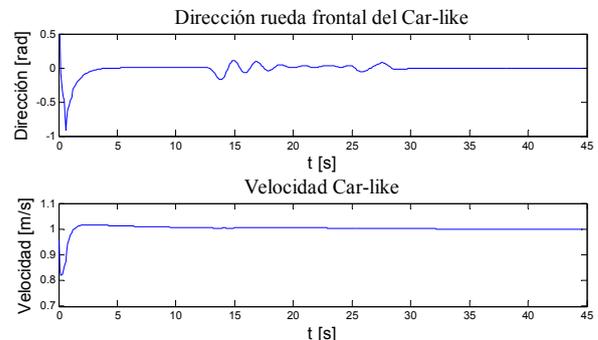


Fig. 7 Simulación 1: Acciones de Control.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un algoritmo de navegación social basada en una heurística simple, que describe adecuadamente a un humano durante su locomoción en entornos compartidos. Se adaptó la heurística para un contexto de interacción humano-robot y se incorporó algunas extensiones que garantizan comportamiento oclofóbico, movimientos anticipados y seguros, y libres de colisión.

Dentro de esto se presentó un algoritmo matemático, capaz de generar curvas de colisión utilizando métodos iterativos, mostrando resultados precisos y eficientes, por lo cual será

TRAYECTORIA HUMANO Y ROBOT

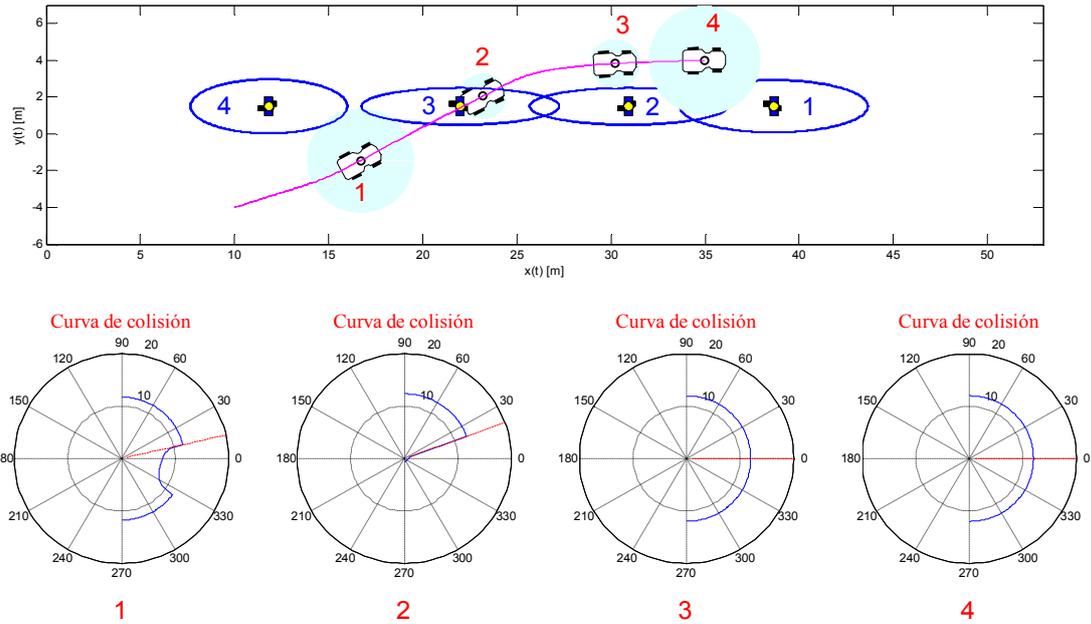


Fig. 8 Trayectoria del humano y del robot. Curvas de colisión para distintos instantes. Se grafica al robot y al humano, junto con las correspondientes curvas de colisión para cuatro instantes de tiempo distintos.

utilizado para futuras implementaciones en el contexto de multi-robot y multi-humano. Se ha demostrado adicionalmente mediante simulación algunos resultados satisfactorios con dos tipos de controladores, uno para seguimiento de trayectoria y otro para control de postura. Donde además se ha explorado los efectos de variaciones en los parámetros del sistema, demostrando eficiencia, suavidad, y seguridad.

En trabajos futuros se realizará experimentos con humanos, para determinar los parámetros óptimos de nuestro sistema, distancias medibles y perfiles de velocidad en el contexto de interacción humano-robot, que podrán ser evaluados mediante encuestas y contrastados sus resultados con diversos tipos de navegación social.

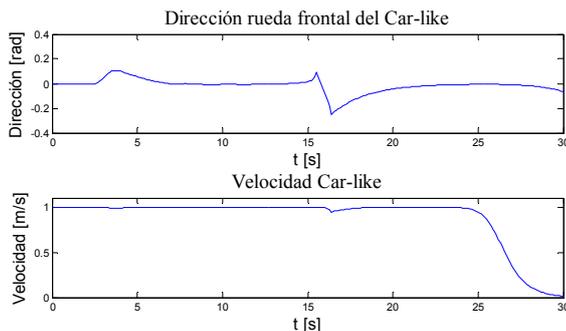


Fig. 9 Simulación 2: Acciones de Control.

REFERENCIAS

- [1] E. A. Sisbot, L. F. Marin-Urias, R. Alami, and T. Simeon, "A Human Aware Mobile Robot Motion Planner," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 874-883, 2007.
- [2] E. T. Hall, "A System for the Notation of Proxemic Behavior," *American Anthropologist*, vol. 65, pp. 1003-1026, 1963.
- [3] A. Salah, J. Ruiz-del-Solar, Ç. Meriçli, and P.-Y. Oudeyer, "Human Behavior Understanding for Robotics," in *Human Behavior Understanding*. vol. 7559, A. Salah, J. Ruiz-del-Solar, Ç. Meriçli, and P.-Y. Oudeyer, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1-16.
- [4] J. Guzzi, A. Giusti, L. M. Gambardella, G. Theraulaz, and G. A. Di Caro, "Human-friendly robot navigation in dynamic environments," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 423-430.
- [5] L. Chi-Pang, C. Chen-Tun, C. Kuo-Hung, and F. Li-Chen, "Human-Centered Robot Navigation Towards a Harmoniously Human Robot Coexisting Environment," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 99-112, 2011.
- [6] P. Ratsamee, Y. Mae, K. Ohara, M. Kojima, and T. Arai, "Social navigation model based on human intention analysis using face orientation," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, 2013, pp. 1682-1687.
- [7] P. Ratsamee, Y. Mae, K. Ohara, T. Takubo, and T. Arai, "Human-robot collision avoidance using a modified social force model with body pose and face orientation," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 10, 2013.
- [8] E. Pacchierotti, H. I. Christensen, and P. Jensfelt, "Evaluation of Passing Distance for Social Robots," in *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 315-320.
- [9] M. Moussaïd, D. Helbing, and G. Theraulaz, "How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, April 18, 2011 2011.
- [10] M. Moussaïd, E. G. Guilloit, M. Moreau, J. Fehrenbach, O. Chabiron, S. Lemerrier, J. Pettré, C. Appert-Rolland, P. Degond, and G. Theraulaz, "Traffic Instabilities in Self-Organized Pedestrian Crowds," *PLoS Comput Biol*, vol. 8, p. e1002442, 2012.
- [11] R. Carelli, J. Santos-Victor, F. Roberti, and S. Tosetti, "Direct visual tracking control of remote cellular robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 805-814, 2006.
- [12] C. Soria, R. Carelli, and M. Muñoz, "Control de Seguimiento de Caminos para un Robot Autónomo" presented at the VII JAR 2012, UNICEN, Olavarria, 2012.
- [13] M. Aicardi, G. Casalino, A. Bicchi, and A. Balestrino, "Closed loop steering of unicycle like vehicles via Lyapunov techniques," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 27-35, 1995.