

Human-Robot Interaction: Legible Behavior Rules in Passing and Crossing Events

D. Herrera, F. Roberti, M. Toibero and R. Carelli, *Senior Member, IEEE*

Abstract— In human-robot interaction, the incorporation of social rules results to be crucial to guarantee the comfort of the human. It must be obtained by means of improving the legibility of the robot motions, because developing soft and smooth motion does not guarantee entirely a social acceptable motion. Hence, in this paper a novel fuzzy logic approach is proposed to incorporate social rules in walking events, where the relative positions, orientations, distances and velocities between the robots and the humans are considered. Additionally to verify its performance, its incorporation in a path-following control through social forces is proposed. The simulation results demonstrate that the system is able to overcome many usual interference situations, and to adapt its behavior to different interference events over time.

Keywords— Human robot interaction, Social rules, Fuzzy logic, Mobile robots.

I. INTRODUCCIÓN

LAS INTERACCIONES humano-robot (IHR) presentan nuevos problemas en temas relacionados con planeación y control, donde los humanos deberían ser tomados explícitamente en cuenta. Estos problemas involucran un comportamiento dinámico, adaptable y dependiente del medio, y particularmente, de los miembros con los cuáles el robot interactúa. Criterios tales como: *seguridad física, sensación de seguridad, movimientos socialmente aceptables y distancia social* deben ser cuantificados para establecer parámetros de diseño intrínsecos a ser tomados en cuenta tanto de manera directa como indirecta. Este hecho está estrictamente relacionado con el confort humano, en lo referente a: accesibilidad, campo de visión, así como en sus preferencias con respecto a su ubicación/velocidad relativa con otro individuo. Desde el punto de vista de las decisiones, un robot social debe garantizar: movimiento seguro, movimiento fiable y eficaz, y, *movimiento socialmente aceptable*. El último hace referencia a tomar en cuenta un modelo específico de comportamiento del humano, con el propósito de inferir sus preferencias y necesidades.

Como se menciona en [1], en las multitudes de peatones, uno puede distinguir al menos cinco tipos de interacciones: evasión de colisiones, interacción física, interacción social, imitación, e, interacción indirecta. En el contexto de la robótica, es necesario encontrar una descripción apropiada de

cómo los robots adaptan su comportamiento de locomoción durante cada uno de estos tipos de interacción y explorar los patrones de comportamiento colectivo a través de simulación, donde efectivamente la distinción entre comportamientos resulta ser crucial para garantizar un comportamiento social. Este trabajo está particularmente enfocado en comportamientos relacionados al primer tipo de interacción.

En años recientes, muchos trabajos han sido propuestos para resolver tal problema con robots sociales en ambientes compartidos. El modelo de fuerzas sociales, fue probablemente el primer modelo de peatón capaz de predecir patrones de comportamiento colectivo, auto-organizado, a partir de interacciones locales entre individuos [2]. Desde su primera publicación en 1995, se han presentado importantes desarrollos de este modelo y nuevos modelos basados en conceptos similares [3]. De esta manera, el modelo de fuerzas sociales puede ser visto hoy como un enfoque comúnmente usado en la comunidad de modeladores de multitudes [1]. Relacionado a interacciones específicas, en [4], la fuerza social repulsiva es removida con el fin de buscar la ruta más rápida al objetivo en el campo de visión humana. Al combinar factores críticos del movimiento humano, tales como posiciones de las salidas, obstáculos y velocidades de los peatones vecinos, la elección de la velocidad es reducida a un problema de optimización discreta. Sin embargo resulta ser poco aplicable en entornos no estructurados y en cierto punto impráctico, debido a que en un ambiente de esta clase podría resultar complicado definir un punto de destino específico.

En este trabajo, se propone un escenario descentralizado, donde el concepto de navegación social es analizado como una alternativa para mejorar la aceptación y autonomía de robots móviles. Un punto clave a mejorar es la legibilidad de los movimientos robóticos, i.e., que una persona intuitivamente entienda las intenciones de un robot [5]. Particularmente este enfoque heurístico cuantifica reglas sociales que son comúnmente usadas por peatones en situaciones de locomoción, i.e., mientras cruzan la trayectoria o pasan junto a otro individuo, donde es necesaria una negociación no-verbal. De este modo, el objetivo consiste en analizar las características de movimiento, tales como: posición relativa, orientación, distancia, etc.; y generar reglas que definan movimientos legibles, fácilmente interpretables por humanos. La suposición básica es que: si un robot se mueve como un humano, entonces este será socialmente aceptado por humanos. Adicionalmente, es importante especificar la tarea que realizará el robot y la metodología utilizada para incorporar el efecto social en el sistema de control. De este modo, la Sección II da una breve descripción del problema. En la Sección III se presenta un algoritmo de navegación social

D. Herrera, Instituto de Automática-CONICET, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, dherrera@inaut.unsj.edu.ar

F. Roberti, Instituto de Automática-CONICET, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, froberti@inaut.unsj.edu.ar

M. Toibero, Instituto de Automática-CONICET, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, mtoibero@inaut.unsj.edu.ar

R. Carelli, Instituto de Automática-CONICET, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

basada en lógica difusa dentro de una tarea de seguimiento de camino. Finalmente, en la Sección IV, tres diferentes situaciones de *interferómetro* son simuladas para verificar el rendimiento de este método.

II. COMPORTAMIENTO HUMANO DIFUSO

Mientras se camina en un espacio abierto, evadir colisiones con otros peatones resulta ser un evento natural. Es así que cruzar a través de la trayectoria de otros peatones (actuando como un *interferómetro*) requiere modular la velocidad, la dirección al caminar o bien ambas. Actualmente la literatura no es del todo concluyente de cómo los humanos ajustan estos dos parámetros en la presencia de un interferómetro. Esto impide el desarrollo de modelos para predecir estrategias generales de evasión de obstáculos en comportamientos del caminar humano [6], y, por tanto resulta difícil su extensión al campo de la robótica móvil.

El presente trabajo toma ventaja de la estrecha relación entre la forma de la trayectoria de la marcha humana en *condiciones normales* mientras alcanza un objetivo y el modelo cinemático simplificado de un robot móvil con ruedas [7]. Bajo este supuesto, el problema está enfocado en las reglas sociales durante la marcha y no en la forma de la trayectoria. En las siguientes secciones se presenta un enfoque basado en lógica difusa para incorporar reglas sociales de una manera adecuada y ajustable. Para demostrar su rendimiento, se considera dentro de un problema de control de seguimiento de camino.

III. NAVEGACIÓN SOCIAL LEGIBLE

A. Control de seguimiento de camino

El modelo cinemático de un robot de tracción diferencial, con punto representativo (x, y) a una distancia a del centro de las ruedas (ver Fig. 1) es dado por las ecuaciones en el espacio de estados

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -a \sin \theta \\ \sin \theta & a \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{C} \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix}, \quad (1)$$

donde, u y w son las velocidades lineal y angular del robot respectivamente, y θ su orientación. Como es propuesto en [8], los errores del sistema de control para el seguimiento de camino son definidos considerando la marco de Frenet-Serret (o marco TNB), donde los errores de distancia y orientación son claramente visualizados (ver Fig. 1), y calculados como

$$\begin{aligned} \tilde{n} &= -n, \tilde{x} = -\tilde{n} \sin \theta_T, \tilde{y} = \tilde{n} \cos \theta_T, \\ \dot{\tilde{n}} &= -\dot{x} \sin \theta_T + \dot{y} \cos \theta_T, \end{aligned} \quad (2)$$

La ley de control para seguimiento de caminos es propuesta como,

$$\begin{pmatrix} u^c \\ w^c \end{pmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{pmatrix} u_T \cos \theta_T + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) \\ u_T \sin \theta_T + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

donde, $\theta_T = \tan^{-1} \left(\frac{dy/ds}{dx/ds} \right) \Big|_{s=s_d}$

y, k_x , k_y , l_x y l_y son constantes de diseño, y, θ_T y u_T la orientación y velocidad deseada en la trayectoria, respectivamente. La tangente hiperbólica es usada para evitar la saturación de los actuadores mediante la correcta selección de las constantes de diseño. Por tanto, considerando una condición de *seguimiento ideal de velocidad*, i.e., $v = v_c$ y $w = w_c$, el sistema en lazo cerrado para el control cinemático previamente diseñado resulta ser

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_T \cos \theta_T + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) \\ u_T \sin \theta_T + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

La prueba de estabilidad del sistema de control propuesto y más detalles acerca de éste pueden ser encontrados en [8].

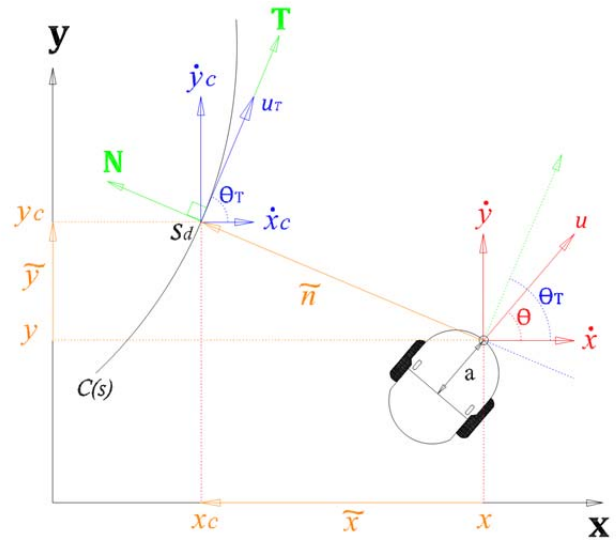


Figura 1. Sistema de control para seguimiento de caminos.

B. Reglas de comportamiento difuso

Esta sección describe la cuantificación de reglas sociales a través de reglas difusas, obtenidas de manera heurística, para determinar un comportamiento socialmente aceptable. La salida de estos comportamientos son fusificados para determinar la tendencia a dos comportamientos extremos: pasar (priorizando cambio de dirección) y cruzar (priorizando cambio de velocidad), los cuales son posteriormente defusificados para ponderar la adaptación de la trayectoria en términos de velocidad, dirección o bien ambos, lo cual garantiza una evasión *humano-amigable*.

Un primer paso consiste en definir las entradas. Para esto, cuatro variables han sido consideradas (ver Fig. 2 y 3):

- **Posición relativa:** cuatro zonas laterales y frontales desde el punto de vista del robot.
- **Orientación relativa:** consiste de cuatro comportamientos diferentes que son esperados, los cuales están relacionados con la predisposición a: *pasar* (“pass”), *alejarse* (“keep off”) o *cruzar* (“cross”) la trayectoria del robot, e inclusive *aproximarse* (“approach”) al robot y generar interacción directa. Aun

cuando la estimación de la intención del humano es un problema interesante, ésta no ha sido considerada en el presente trabajo.

- **Distancia relativa:** relacionado con la distancia relativa entre humano y robot.
- **Velocidad relativa:** la velocidad de aproximación entre humano-robot.

Como única salida, se considera un **factor de comportamiento** con cinco posibles estados, desviación: *high left (HL)*, *left (L)*, *right (R)* y *high right (HR)* (garantizando un cambio de dirección suave o fuerte), y un estado adicional, llamado: *keep direction (KD)*, el cual usualmente prioriza una modulación de velocidad para garantizar la evasión (ver las funciones de pertenencia utilizadas en la Fig. 4.

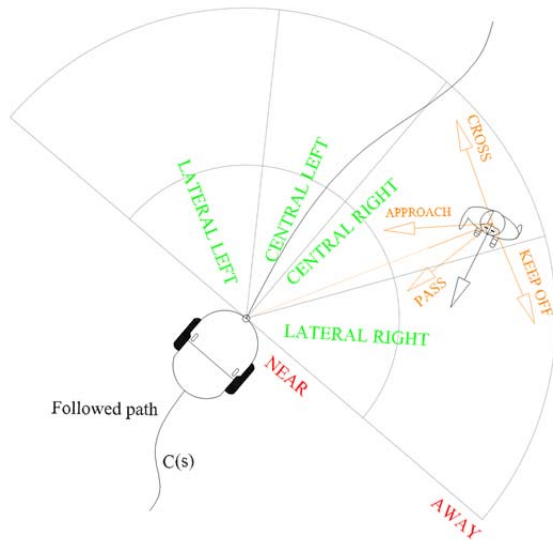


Figura 2. Entradas difusas usadas para definir el comportamiento.

a) Reglas de comportamiento en eventos de paso

Un *comportamiento de paso* puede ser usualmente encontrado en escenarios de corredor, donde es esperado un encuentro frontal, y donde se debe garantizar para cada individuo un espacio libre para caminar. De este modo, es esperado que el robot tienda a adaptar su camino en términos de una adaptación de dirección, alejándose de la marcha humana. Con este propósito se han diseñado las primeras cuatro reglas difusas (ver Tabla 1).

b) Reglas de comportamiento en eventos de cruce

El *comportamiento de cruce* es usualmente encontrado en la intersección de caminos o corredores, donde una negociación no-verbal es desarrollada para definir: quién espera y quién pasa a través. En este caso, el robot juega un rol pasivo (por razones de seguridad). Para esto, se han diseñado las siguientes ocho reglas difusas (5-12), que adaptan la trayectoria como una combinación de cambio de velocidad y dirección.

Para esto, la velocidad relativa y la distancia son utilizadas para generar un movimiento de *paso por detrás*. Las últimas dos reglas son definidas considerando otros dos comportamientos humanos: humano alejándose y aproximándose al robot. En estos casos se espera un efecto de

mantener la dirección. En el primer caso, la fuerza social es posiblemente cercana o igual a cero, i.e. no existe interacción al no aproximarse lo suficiente, pero en el segundo caso se genera una adaptación de velocidad para garantizar un modo de interacción pasiva.

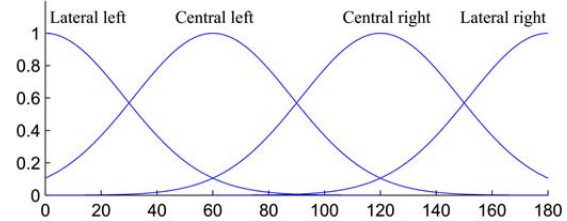
C. Zona social para el humano

Si la pose del humano es (\mathbf{X}_h, θ_h) , entonces la zona social del humano es definida como

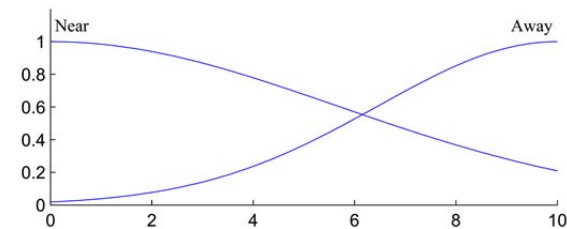
$$\mathbf{X}_e(\theta_e) = \begin{pmatrix} x_e(\theta_e) \\ y_e(\theta_e) \end{pmatrix} + \mathbf{R} \begin{pmatrix} m_a \cos \theta_e \\ m_i \sin \theta_e \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{siendo, } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h \end{pmatrix},$$

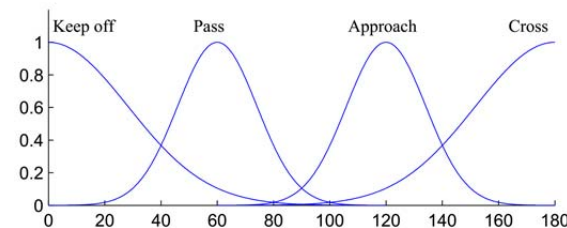
que representan las posiciones de los puntos del espacio personal del humano (una elipse rotada θ_h por \mathbf{R} y con centro en \mathbf{X}_h), distribuida un ángulo, θ_e (variando de $0-2\pi$). m_i y m_a son el semi-eje menor y mayor respectivamente. Esta forma de zona social humana es comúnmente encontrada en la bibliografía.



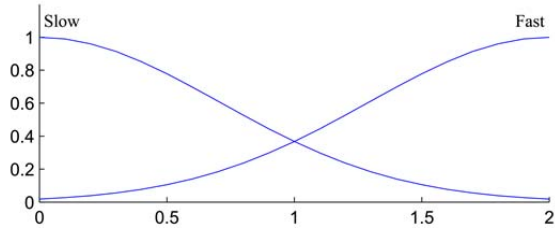
(a) Posición relativa humano-robot (grados).



(b) Distancia relativa humano-robot (metros).



(c) Orientación relativa desde la dirección "keep off" (grados).



(d) Velocidad de aproximación entre humano-robot (metros/segundo).

Figura 3. Funciones de pertenencia de las entradas difusas.

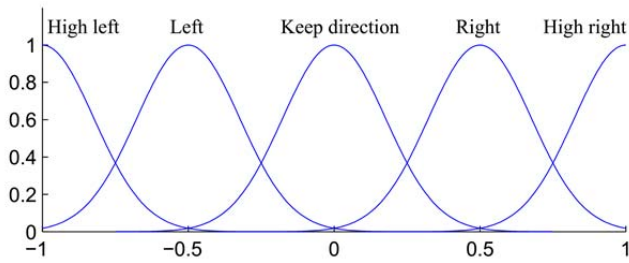


Figura 4. Funciones de pertenencia de la salida difusa.

TABLA I
REGLAS DIFUSAS PARA DEFINIR UN COMPORTAMIENTO SOCIALMENTE ACEPTABLE

Reglas		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Posición relativa	LL									✓	✓	✓	✓		
	CL			✓	✓										
	CR	✓	✓												
	LR					✓	✓	✓	✓						
Distancia relativa	Near	✓		✓			✓	✓	✓		✓		✓		
	Away		✓		✓	✓		✓		✓		✓			
Orientación relativa	K.O														✓
	Pass.	✓	✓	✓	✓										
	Appr.													✓	
	Cross					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Velocidad relativa	Slow						✓	✓			✓	✓			
	Fast					✓	✓			✓	✓				
de comportamiento	HL	✓								✓					
	L		✓								✓	✓			

	KD				✓	✓	✓
	R		✓		✓	✓	
	HR	✓			✓		

LL: Lateral izq., CL: Central izq., CR: Central derecho, LR: Lateral der., KO: "Keep off", Appr: "Approach", HL: "High left", L: "Left", KD: "Keep direction", R: "Right", HR: "High right"

D. Modelo de fuerza social

En un ambiente compartido se presentan fuerzas sociales ficticias de objetos y humanos. De este modo un humano tiende a adaptar su velocidad o dirección de acuerdo a estas perturbaciones, las cuales han sido tradicionalmente modeladas como fuerzas repulsivas.

Este trabajo propone una nueva composición de la fuerza social que permita incorporar el factor social, donde la predisposición entre dos comportamientos extremos antes mencionados, i.e. pasar o cruzar, es dado por una salida de lógica difusa defusificada. Ésta permite ponderar dos componentes, las cuales caracterizan un comportamiento compuesto. Donde la primera actúa sobre la velocidad del robot y la siguiente sobre la forma del camino de referencia, permitiendo evadir colisiones con individuos de una manera social. De esta manera, las fuerzas sociales resultantes son modeladas como sigue.

La magnitud de la fuerza social repulsiva es dada como [2]:

$$f_{social}(t) = \begin{cases} -ae^{\frac{d(t)}{b}}, & d(t) \geq 0 \\ 0, & d(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

donde a y b son constantes positivas que representan la magnitud y rango de la fuerza social, y,

$$d(t) = r_{robot} + r_{humano}(t) - d_{h/r}(t), \quad (7)$$

donde (\mathbf{X}_h, θ_h) y (\mathbf{X}_r, θ_r) son la pose del humano y del robot respectivamente, y, $\mathbf{X}_e(\theta_e)$ es un punto en la zona social elíptica de un humano en la dirección θ_e del robot.

Entonces, las fuerzas sociales son definidas como:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_u(t) &= (1 - |\tau(t)|)f_{social}(t)\mathbf{v}_{u(t)}, \\ \mathbf{f}_N(t) &= \tau(t)f_{social}(t)\mathbf{v}_N, \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\tau(t)$ es la variable de salida defusificada (normalizada entre [-1,1]), la cual determina el factor de comportamiento dominante acorde a reglas difusas sociales (ver Fig. 4). \mathbf{v}_N y $\mathbf{v}_{u(t)}$ son la dirección normal al camino y la dirección de la velocidad del robot respectivamente (ver Fig. 5).

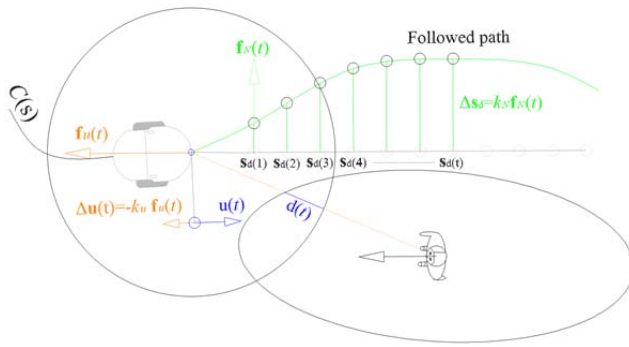


Figura 5. Efecto de la fuerza social en el seguimiento de camino.

De esta manera, el sistema robot/camino es modificado acorde a su comportamiento predominante. Así, si el punto deseado \mathbf{s}_d sobre el camino (el próximo más cercano) es considerado y definido en el sistema de coordenadas x - y como $\mathbf{s}_d = (x_c \ y_c)^T$, su modificación debido a la fuerza social es dada por:

$$\mathbf{s}_d^* = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} + \Delta \mathbf{s}_d, \quad \Delta \mathbf{s}_d = k_N \mathbf{f}_N, \quad (9)$$

donde $k_N(t)$ en $[m/N]$ es una constante física que pondera la relación entre fuerza social y adaptación del camino. Adicionalmente se utiliza un proceso de filtrado simple para garantizar la suavidad en el cambio del camino. Este consiste en promediar los puntos vecinos de \mathbf{s}_d en el camino con el resultante \mathbf{s}_d^* y utilizar este valor como el *siguiente más cercano* deseado se calculan los errores de control igual que en (2). De esta manera, la Eq. (3) resulta modificada como sigue:

$$\begin{pmatrix} u^c \\ w^c \end{pmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{pmatrix} (u_T + \Delta u) \cos \theta_T^* + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}^*\right) \\ (u_T + \Delta u) \sin \theta_T^* + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}^*\right) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

donde $\Delta u = -k_u \mathbf{f}_u$, siendo $k_u(t)$ $[m/(s.N)]$ una constante física que pondera la relación entre fuerza social y cambio de velocidad, y,

$$\theta_T^* = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \Big|_{s=\mathbf{s}_d^*}.$$

Considerando que estas adaptaciones del sistema son realizadas en las entradas de referencia y que son acotadas y continuas, el control utilizado para seguir el camino resulta ser estable y su rendimiento no es afectado [8].

IV. SIMULACIONES

En las siguientes simulaciones se recrea un interferómetro humano sin un modelo cinemático especial, esto es, su movimiento es únicamente gobernado por un movimiento lineal uniforme. Él camina en un escenario compartido con un robot de tracción diferencial simulado, el cuál es programado con un modelo dinámico de un robot Pioneer 3A-T previamente identificado. Una compensación dinámica no fue considerada relevante para este trabajo. De esta forma se

verifica el rendimiento del control cinemático presentado. Y finalmente, el método es considerado y probado para diferentes casos. Para todas las simulaciones se considera que las velocidades deseadas del robot y del humano son ajustadas en $1 [m/s]$.

a) Simulación N° 1 - Interferómetro en 90°

Para esta primera simulación, se considera el caso de un interferómetro en 90° (ver Fig. 6), comúnmente denominado *situación de cruce*.

En la Fig. 7 se presenta la trayectoria, orientación y velocidad del robot. En donde se presenta una clara modulación de la velocidad y una desviación parcial a manera de *pasar por detrás*. Para esto, el factor de comportamiento y el efecto de las fuerzas sociales sobre el sistema robot-camino se ajustan como se muestra en la Fig. 8.

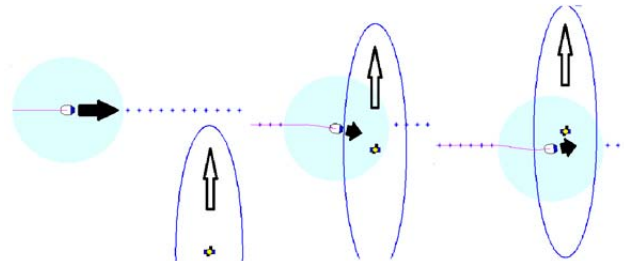


Figura 6. Evento de cruce en 90° .

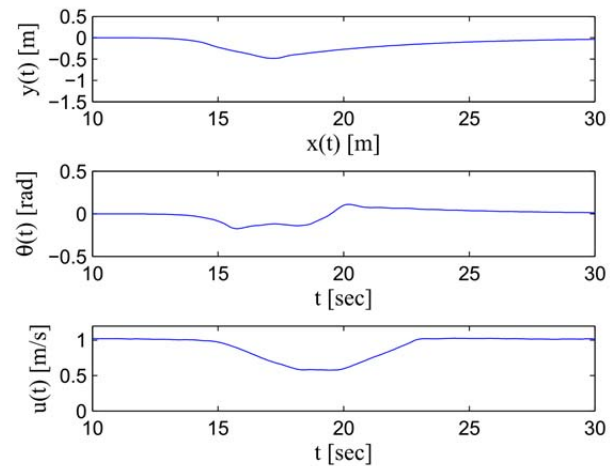


Figura 7. Camino recorrido y acciones de control.

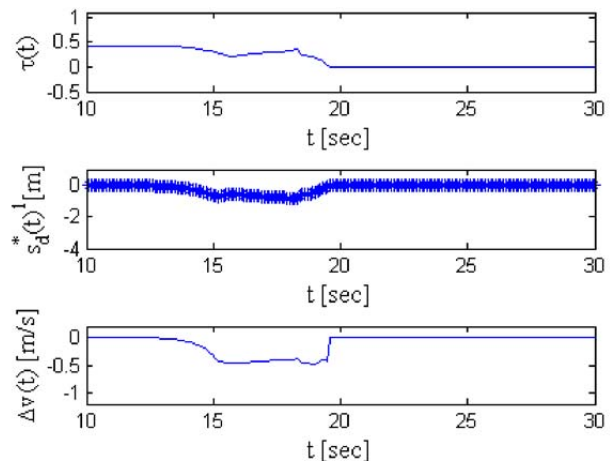


Figura 8. Factor de comportamiento y efecto de las fuerzas sociales.

b) Simulación N° 2 - Interferómetro en 0°

Para esta simulación se considera el caso de un interferómetro a 0° (ver Fig. 9), comúnmente denominado *situación de paso*.

En la Fig. 10 se presentan la trayectoria, orientación y velocidad del robot, en donde se nota un claro ajuste en la dirección, además de ligeros periodos de aceleración/desaceleración durante la evasión. El factor de comportamiento, y, los efectos de la fuerza social sobre el sistema robot-camino son presentados en la Fig. 11.

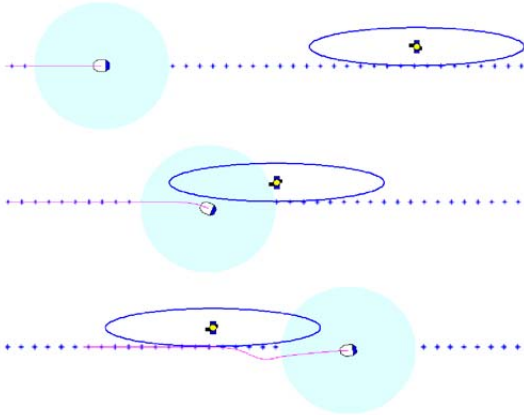


Figura 9. Evento de paso en 0°.

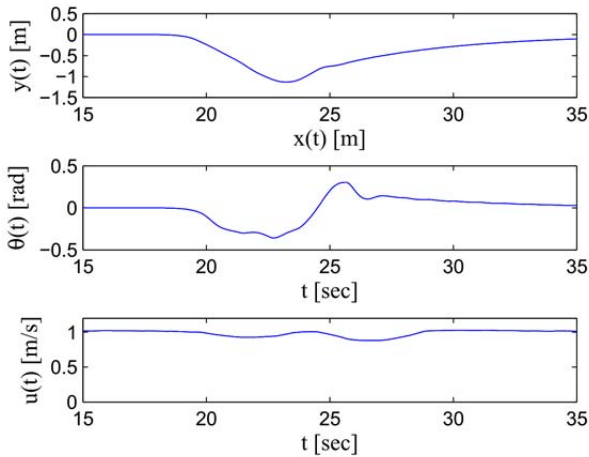


Figura 10. Camino recorrido y acciones de control.

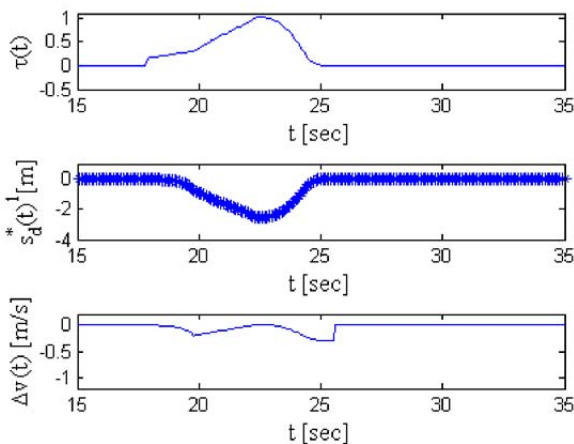


Figura 11. Factor de comportamiento y efecto de las fuerzas sociales.

c) Simulación N° 3 - Interferómetro en 45°

Para esta simulación se considera el caso de un interferómetro en 45° (ver Fig. 12).

En la Fig. 13 se presentan la trayectoria, orientación y velocidad del robot, donde se observa un mínimo ajuste de dirección, y eventos dominantes de aceleración/desaceleración durante la evasión. La trayectoria de velocidad exhibe una forma que es comúnmente presentada en la literatura para *eventos de cruce*. Del mismo modo, el factor de comportamiento, y, los efectos de la fuerza social sobre el sistema robot-camino son presentados en la Fig. 14.

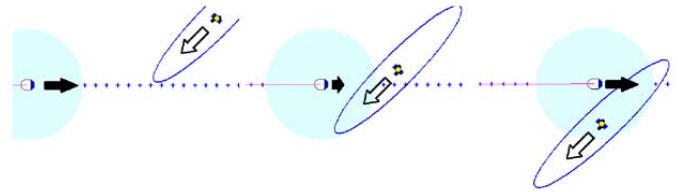


Figura 12. Evento de cruce en 45°.

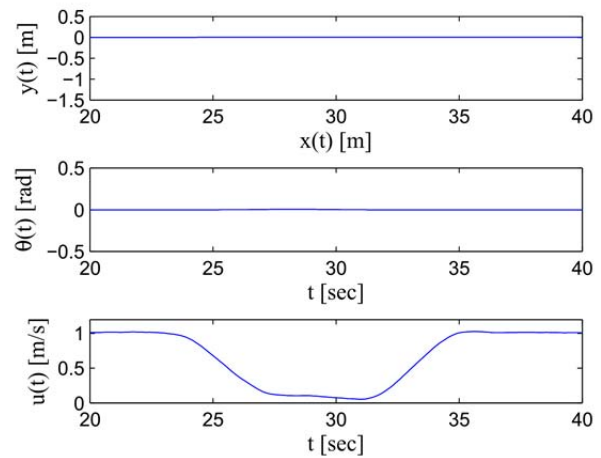


Figura 13. Camino recorrido y acciones de control.

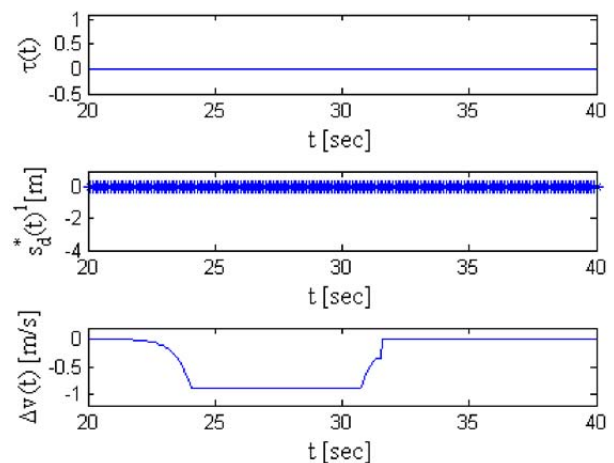


Figura 14. Factor de comportamiento y efecto de las fuerzas sociales.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado la cuantificación de reglas sociales mediante lógica difusa para escenarios de evasión. Este permite identificar diferentes comportamientos, esto es,

ajustes de la velocidad del robot o del camino cuando evade colisiones con humanos. Para esto se ha propuesto una nueva composición del modelo de fuerzas sociales y su incorporación en un escenario de seguimiento de camino. Se ha validado mediante simulación para diferentes casos de interferómetros, demostrando ser viable y fácil de ajustar. Basado en sus decisiones y resultados, se puede decir que este algoritmo evoca un comportamiento socialmente aceptable. Sin embargo, se prevé probar este método en un escenario real e incorporar la intención humana para mejorar sus resultados. Adicionalmente se espera desarrollar algoritmos adaptables basados en aprendizaje, por ejemplo algoritmos ANFIS, para mejorar la cuantificación entre el efecto de la fuerza social y sus reglas sociales involucradas, esto es, adaptar y aprender mediante el uso de información experimental. Finalmente, se espera contrastar sus resultados con algoritmos tradicionales en lo referente a pruebas de *comfort*.

REFERENCIAS

- [1] M. Moussaïd and J. Nelson, "Simple Heuristics and the Modelling of Crowd Behaviours," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, U. Weidmann, U. Kirsch, and M. Schreckenberg, Eds., ed: Springer International Publishing, 2014, pp. 75-90.
- [2] D. Helbing and P. Molnár, "Social force model for pedestrian dynamics," *Physical Review E*, vol. 51, pp. 4282-4286, 1995.
- [3] 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.
- [4] Q.-L. Wang, Y. Chen, H.-R. Dong, M. Zhou, and B. Ning, "A new collision avoidance model for pedestrian dynamics," *Chinese Physics B*, vol. 24, p. 038901, 2015.
- [5] T. Kruse, P. Basili, S. Glasauer, and A. Kirsch, "Legible robot navigation in the proximity of moving humans," in *Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2012 IEEE Workshop on*, 2012, pp. 83-88.
- [6] M. Huber, Y.-H. Su, M. Krüger, K. Faschian, S. Glasauer, and J. Hermsdörfer, "Adjustments of Speed and Path when Avoiding Collisions with Another Pedestrian," *PLoS ONE*, vol. 9, p. e89589, 2014.
- [7] G. Arechavaleta, J. P. Laumond, H. Hicheur, and A. Berthoz, "The nonholonomic nature of human locomotion: a modeling study," in *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*, 2006, pp. 158-163.
- [8] V. H. Andaluz, F. Roberti, J. M. Toibero, R. Carelli, and B. Wagner, "Adaptive Dynamic Path Following Control of an Unicycle-Like Mobile Robot," in *Intelligent Robotics and Applications*. vol. 7101, S. Jeschke, H. Liu, and D. Schilberg, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 563-574.



Daniel Herrera was born in Riobamba, Ecuador. He received his degree in Electronic and Control Engineering from the National Polytechnic School of Ecuador in 2012, where he was also Assistant of Laboratory at the Department of Automation and Industrial Control. He is currently a Ph.D. Candidate in Control Systems Engineering at the Automatics Institute of the National University of San Juan, Argentina.

His research interests are human-robot interactions, artificial intelligence and robots modeling.



Flavio Roberti was born in Buenos Aires, Argentina in 1978. He graduated in Engineering from the National University of San Juan, Argentina in 2004, and obtained a Ph.D. degree in Control Systems Engineering from the National University of San Juan, Argentina in 2009. He is currently Assistant Professor at the National University of San Juan and Researcher of the National Council for Scientific and

Technical Research (CONICET, Argentina). His research interests are robotics; wheeled mobile robots; mobile manipulators, visual servoing and passivity based visual control.



Marcos Toibero was born in Santa Fe, Argentina, in 1977. He received the B.E. degree in electrical engineering from the Technological National University of Argentina, in Paraná, Argentina, in 2002, and the Ph.D. degree in Engineering from the San Juan National University, San Juan, Argentina, in 2007. In 2005, he joined the Instituto de Automática (INAUT), in the San Juan National University of

Argentina, as an Assistant Professor of the course Control III and also in the postgraduate course of Nonlinear System Control. In 2011 became a Researcher of the CONICET (Argentinean National Council of Research). His current research interests include robotics control, nonlinear systems, switching systems, robot-human interaction, control of autonomous systems in general and precision agriculture applications.



Ricardo Carelli (M'76 - SM'98) was born in San Juan, Argentina. He graduated in Engineering from the National University of San Juan, Argentina, and obtained a Ph.D. degree in Electrical Engineering from the National University of Mexico (UNAM). He is full professor at the National University of San Juan and senior researcher of the National Council for Scientific and Technical Research (CONICET, Argentina). Prof. Carelli is Director of the Instituto de Automática, National University of San Juan (Argentina). His research interests are on Robotics, Manufacturing Systems, Adaptive Control and Artificial Intelligence Applied to Automatic Control. Prof. Carelli is a senior member of IEEE and a member of AADECA-IFAC.