

Interacción persona-robot: Arquitecturas de Control y Planificación

Juan Antonio Corrales Ramón

Departamento de Electrónica y Computación
Universidad de Santiago de Compostela

Interdependencias en la interacción

3 interacciones humano-robot según sus interdependencias:

- Instrucción (Maestro-Esclavo): El humano define el objetivo a seguir por el robot sin interacciones sociales complejas.
- Cooperación: Secuencia de acciones hacia un objetivo común. Cada uno realiza acciones en sub-tareas independientes.
- Colaboración: Requiere representaciones compartidas del entorno ya que las acciones son interdependientes para conseguir el objetivo común. Está basada en aprendizaje-adaptación mutuos y confianza mutua ('trust').

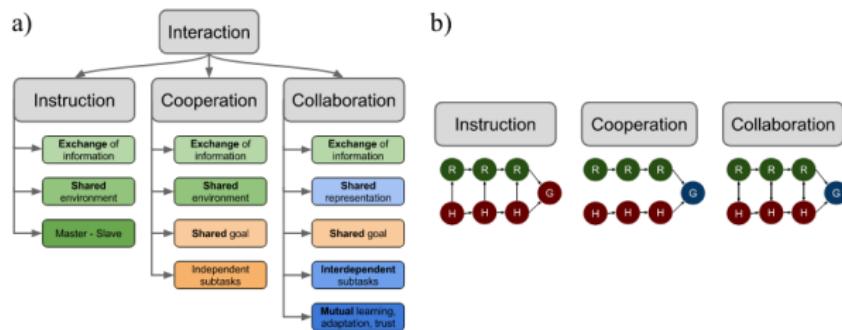


Figure 1: Tipos de HRI según sus interdependencias [arXiv:1705.10146](https://arxiv.org/abs/1705.10146)

Taxonomías HRI

System Requirements	Interaction Type	Human Roles	Spatio-Temporal
Task Type	Ratio of People to Robots	Human Interaction Roles	Time–Space Taxonomy
Task Criticality	Level of Shared Interaction Among Teams	Decision Support for Operators	Human–Robot Physical Proximity
Robot Morphology	Composition of Robot Teams	Level of Autonomy-Amount of Intervention	

Figure 2: Taxonomía HRI. DOI:[10.1109/ICSMC.2004.1400763](https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1400763)

Robot Description & Illustration	Field of Application	Exposure to
	industry service military & police space expedition disaster education entertainment none	robot embodied depleted setting field laboratory
Robot Task Specification	Robot Morphology	Degree of Robot Autonomy
information exchange precision physical load reduction transport manipulation cognitive stimulation emotional stimulation physical stimulation	appearance communication movement content a (anthropomorphic) z (zoomorphic) t (technical)	information acquisition invention analysis decision making action implementation
Human Role	Communication Channel	Proximity
supervisor operator collaborator cooperator bystander	auditory electronic mechanical acoustic optic	temporal synchronous asynchronous physical following touching approaching passing proximate none
Team Composition	output tactile acoustic visual	
$N_H = N_R$ $N_H > N_R$ $N_H < N_R$		

Figure 3: Clasificación HRI multi-criterio.
DOI:[10.1007/s12369-020-00666-5](https://doi.org/10.1007/s12369-020-00666-5)

Requerimientos del Sistema

- Tipo de tarea-aplicaciones:
 - industrial
 - servicios
 - militar/policía
 - exploración espacial
 - terapia
 - educación
 - entretenimiento
- Riesgo de la tarea para el humano:
 - alto: robot industrial pesado
 - medio: robot de asistencia
 - bajo: robot social
- Morfología del robot (se puede evaluar en 4 dimensiones: apariencia, comunicación, movimiento y contexto):
 - antropomórfico
 - zoomórfico
 - técnico

Nivel de interacción en equipos

- A: 1H da órdenes a 1R que devuelve datos sensoriales
- B,C: 1H controla 2R (1 orden al equipo de R o 2 órdenes)
- D,E: 2H controlan 1R (con o sin coordinación)
- F,G: 2H controlan 2R (1 comando coordinado entre H que luego reparten los R; 1 comando coordinado entre H que se ejecuta independientemente en R).
- H: 2H envían comandos independientes (sin coordinación) a un equipo de R que deben solucionar conflictos posibles.

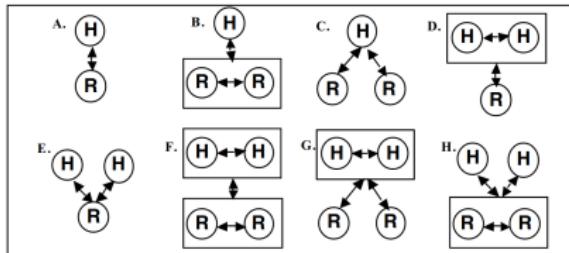


Figure 4: Equipos HRI. DOI:10.1109/ICSMC.2004.1400763

Grado de autonomía del robot

- Intercambio de información: Recupera información del entorno que envía al humano (safety&rescue)
- Precisión: Ejecuta tareas de precisión (cirugía)
- Reducción de carga física: Alivia al humano (exoesqueletos)
- Transporte: Lleva objetos de un lugar a otro (almacenes)
- Manipulación: Modifica el entorno (soldadura, pick&place)
- Estimulación cognitiva: Implica al humano a nivel cognitivo (educación)
- Estimulación emocional: Estimula expresiones emocionales y reacciones (robots mascota)
- Estimulación física: Rehabilitación y tratamientos (robots terapéuticos)

Roles del humano

- Supervisor: Monitoriza el robot y da instrucciones de cómo ejecutar la tarea pero no necesita controlarlo directamente
- Operador: Controla el robot con sinergias entre ambos
- Colaborador: Compañero de trabajo con el mismo objetivo global y subdivisión de tareas con el mismo nivel jerárquico
- Cooperador: Trabajan juntos con un objetivo común pero con sub-tareas independientes
- Espectador: El humano no interactúa con el robot pero comparte el mismo espacio de trabajo. Este modo se llama 'co-existencia' y se debe garantizar la seguridad del humano

Nivel de proximidad

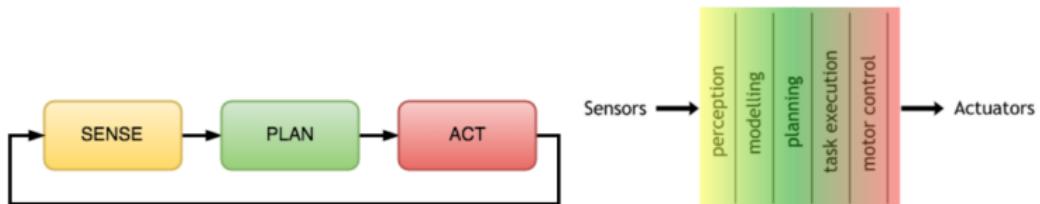
- Temporal:
 - Síncrona: El robot y el humano trabajan al mismo tiempo
 - Asíncrona: El robot y el humano trabajan en tiempos diferentes
- Física:
 - Seguimiento: Contacto físico estable durante un tiempo prolongado a través de una interfaz (co-manipulación de un objeto o joystick de control)
 - Contacto directo (pHRI): El robot y el humano tienen contacto directo
 - Acercamiento: El humano y el robot trabajan en el mismo entorno pero sin contacto físico
 - Paso: Los espacios de trabajo del humano y el robot se solapan de manera parcial y no hay contacto
 - Evitamiento: El humano y el robot trabajan a una cierta distancia que se monitoriza para garantizar la seguridad
 - Ninguna: El humano y el robot no trabajan en el mismo entorno

Requerimientos Arquitectura Software de Robots Sociales

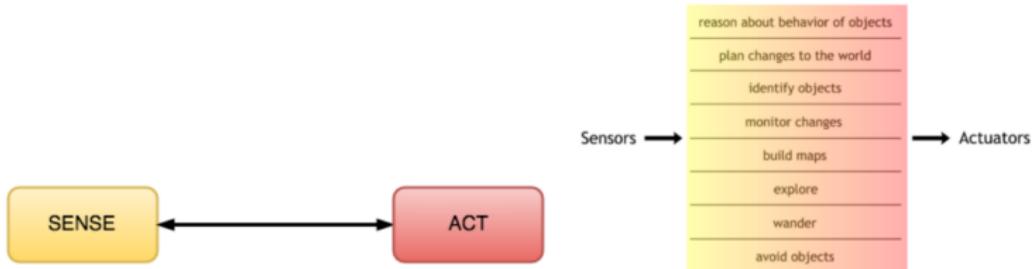
- Arquitectura modular distribuída: Capas físicas y abstractas con procesamiento paralelo y computación distribuída.
- Arquitectura de control de bajo nivel: control de motores, lectura de sensores, cálculos cinemáticos y procesamiento de señales.
- Plataforma hardware independiente del robot: adaptación del control de bajo nivel a diferentes robots.
- Arquitectura de alto nivel de razonamiento deliberativo: Implementa los modelos emocionales y las tareas del robot.
- Un sistema de percepción de alto nivel: Extrae características relacionadas con emociones, empatía y aspectos sociales.

Arquitecturas Software en Robots Sociales I

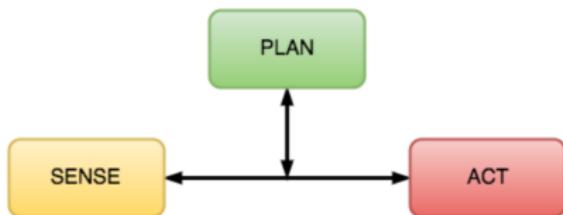
- Paradigma jerárquico: El robot repite en bucle tres pasos:
 - Siente el entorno para construir un modelo de éste
 - Planifica sus acciones para llegar a un objetivo según el modelo
 - Ejecuta la primera acción



- Paradigma reactivo: La etapa de planning desaparece para obtener un sistema más ligero y rápido. Se basa en la definición de un conjunto de comportamientos ('behaviors') simples ejecutados en paralelo para una tarea más compleja.



- Paradigma híbrido (deliberativo+reactivo): Se combinan comportamientos reactivos (sense+act) con actividades de planificación (deliberativas) para optimizar tareas complejas:
 - El robot planifica primero la descomposición de la tarea en sub-tareas según diversos criterios de optimización.
 - Después decide qué comportamientos reactivos ('skills') son más adecuados para ejecutar cada sub-tarea.
 - La información sensorial se usa tanto para la planificación (modelo del mundo) como para el control (reactivo).
 - Para resolver comportamientos paralelos en conflicto se implementan mecanismos de decisión ('decision-making') que pueden incluir conocimiento previo del proceso.



Tipos Arquitecturas Híbridas

- Gerencial ('Managerial'): Agentes de alto nivel definen un plan general que se pasa a los agentes subordinados para ser refinado y reservar los recursos. Finalmente, se pasa a los comportamientos reactivos en el nivel más bajo. Cada capa-agente resuelve sus problemas pero puede preguntar al agente superior si no es capaz.
- Jerarquía de estados: 3 capas según el estado del conocimiento. Los comportamientos reactivos no tienen estado (sólo dependen del presente) mientras que las acciones deliberativas pueden utilizar información del pasado (secuencia de comandos) o del futuro (misión y path planning). Las capas superiores pueden acceder la salida de las capas inferiores y operar sobre la siguiente capa inferior.
- Basadas en modelos: Los comportamientos acceden a porciones de un modelo del mundo compartido por todas las capas-agentes.

Ejemplos Arquitecturas Híbridas

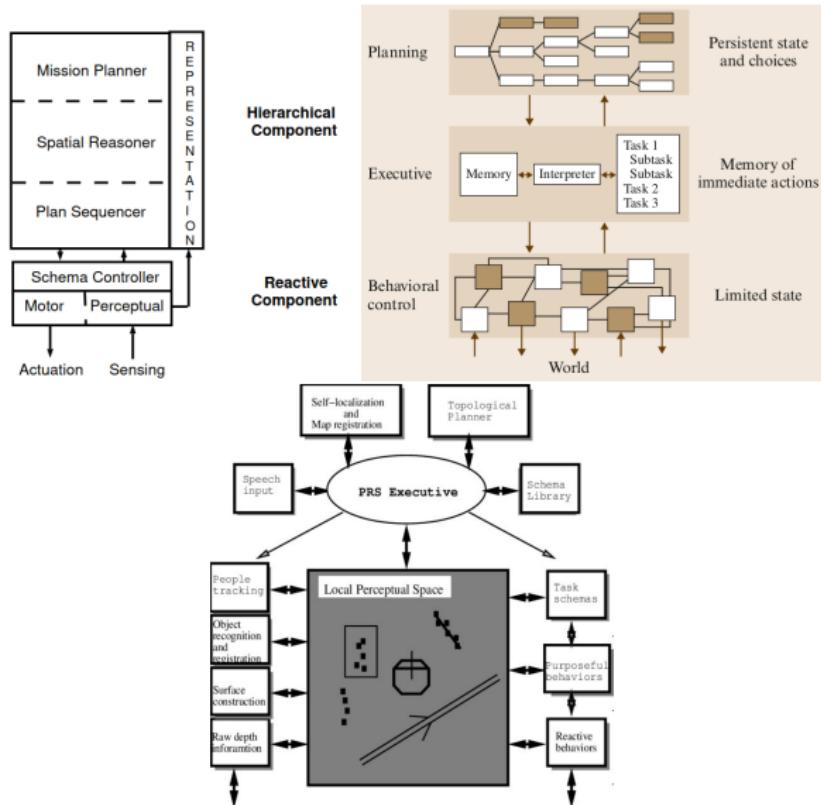
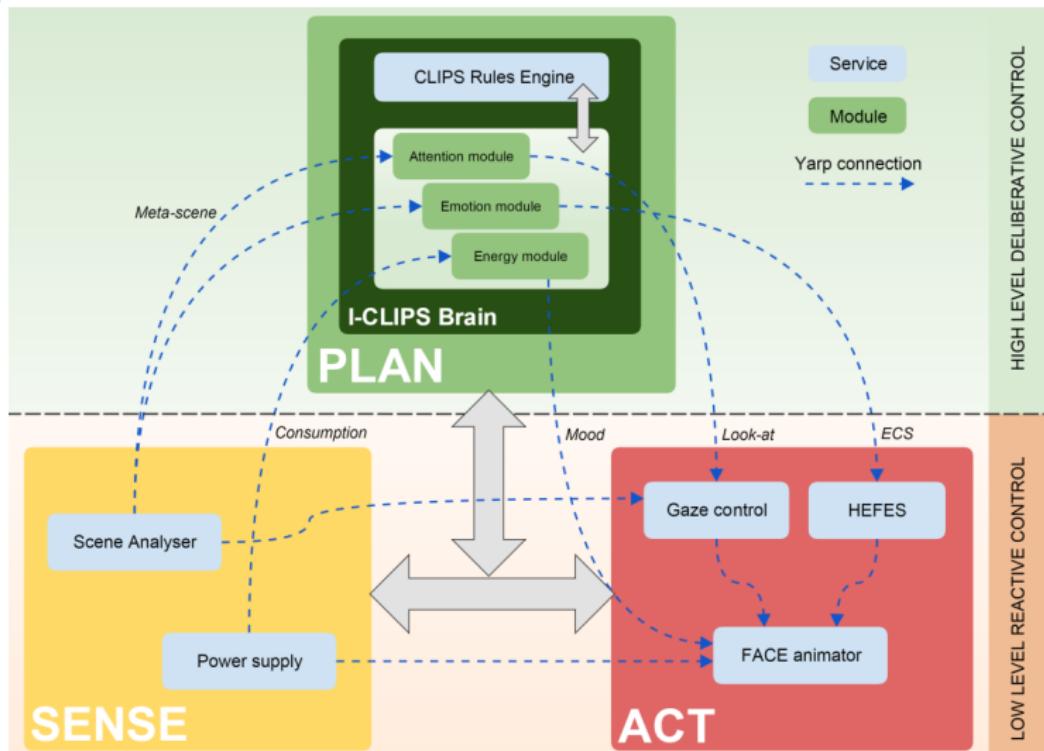


Figure 5: AuRA (Gerencial); 3L (Jerarquica); Saphira (Modelos)

Ejemplo 1 Arquitectura Híbrida Social: FACE I

- Robot FACE (Facial Automaton for Conveying Emotions):
Humanoide realista con 32 servo-motores en el cráneo/torso para simular los músculos faciales.

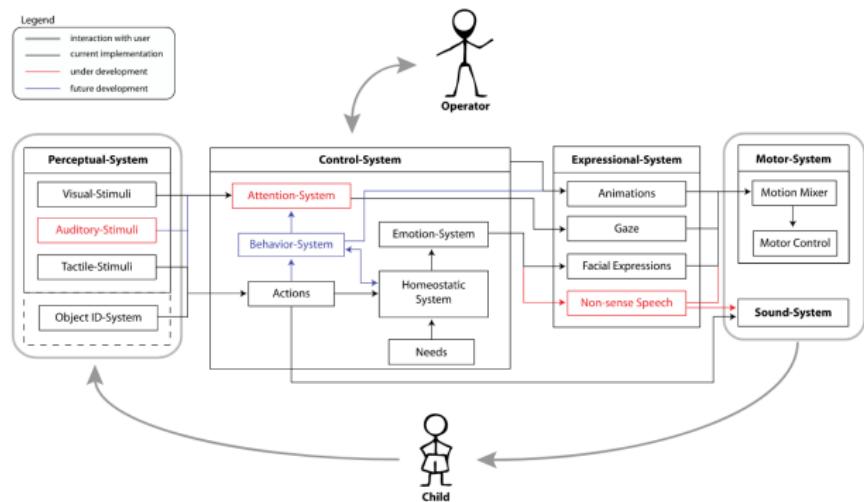


Ejemplo 1 Arquitectura Híbrida Social: FACE II

- SENSE: El 'scene analyser' procesa la información de una cámara RGBD para extraer las características del objeto meta-escena (expresiones faciles, gestos, posición e identificación del habla de las personas en la escena). 'Power supply' verifica el consumo del robot.
- ACT: El 'gaze control' gestiona los ojos y el cuello del robot para centrar la mirada en el punto 'Look-at' identificado por el planner. HEFES ('Hybrid Engine for Facial Expressions Synthesis') controla las emociones de la cara según el ECS ('Emotional Circumplex Space') y calcula los valores de los motores para la expresión facial correspondiente. 'Face animator' arbitra entre posibles conflictos de expresiones faciales.
- PLAN: Sistema experto I-CLIPS basado en reglas. Define los comportamientos del robot y los modelos de interacción mediante un lenguaje de script.

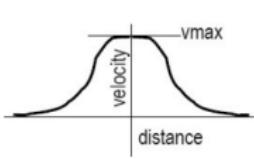
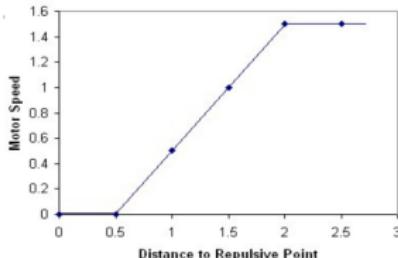
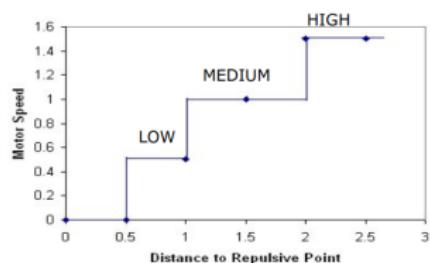
Ejemplo 2 Arquitectura Híbrida Social: Probo

- Robot Probo zoomórfico y 'huggable' para interacción social y terapéutica con niños. Contiene 20 dof para comunicar emociones y atención a través de expresiones faciales y la mirada. Dispone de un 'Combination Engine' para combinar comandos de movimiento de un operador con movimientos generados por la arquitectura cognitiva del robot.



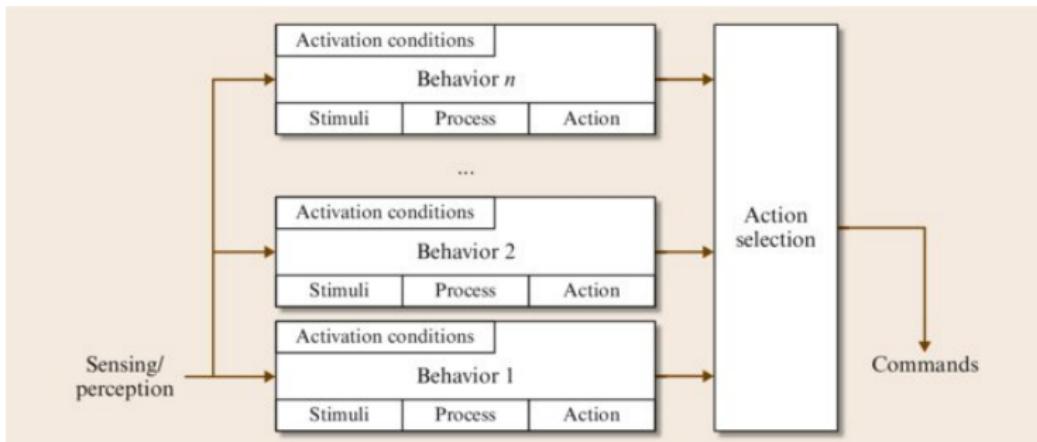
Sistemas de control Basados en Comportamientos

- Alternativa multi-robot a sistemas híbridos (mono-robot) que combina capacidades deliberativas y reactivas sin una capa intermedia y basada en la adaptación animal a su entorno.
- A diferencia de las arquitecturas reactivas, guardan un estado interno y representaciones del entorno (distribuidas).
- Un behavior se puede modelizar como una tripleta (S, R, β) , siendo S los estímulos sensoriales, R las posibles respuestas del robot y β la función de mapeado entre ambos:
 - La presencia de un estímulo no activa inmediatamente la respuesta correspondiente ya que tiene que cumplir unas condiciones de activación (P.Ej. superar un umbral).
 - La respuesta se puede codificar de manera discreta (P.Ej. con if/else) o de manera continua (P.Ej. $vel = 1/distancia^2$)



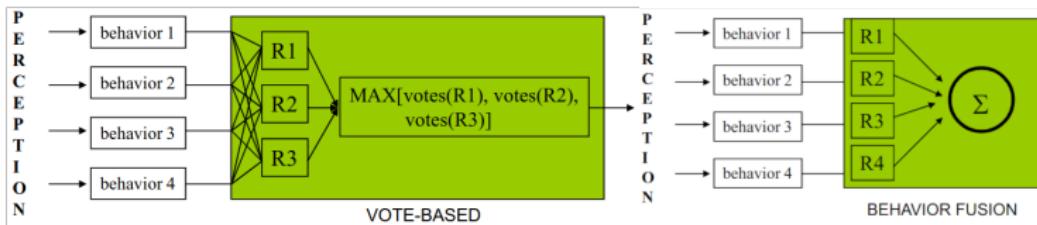
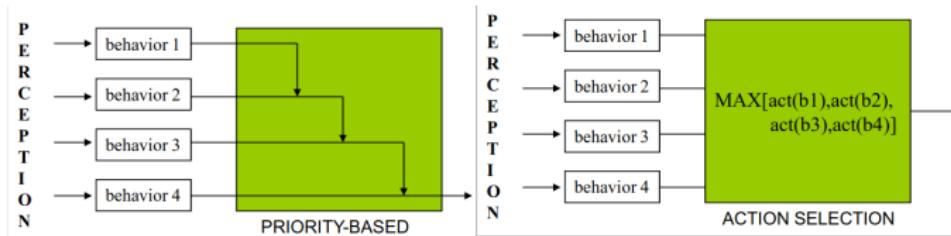
Paralelismo y Jerarquía de Comportamientos

- Los behaviors se codifican de manera sencilla y se añaden de manera incremental (bottom-up) al sistema:
 - Behaviors reactivos (low-level): control de motores, tratamiento sensorial...
 - Behaviors simples: avance del robot, girar a la derecha...
 - Behaviors complejos (high-level, deliberativos): seguir una línea, evitar obstáculos...
- Los behaviors se ejecutan de manera paralela y se pueden invocar entre sí: complejos→simples→reactivos



Coordinación de Comportamientos

- Selección por prioridad: Jerarquía fija entre behaviors de tal modo que los más prioritarios inhiben los menos prioritarios.
- Selección por nivel de activación: Cada behavior tiene un valor de activación dinámico y se ejecuta el mayor
- Selección por voto: Cada acción de cada behavior recibe votos y se ejecuta aquella con mayor número de votos
- Fusión: Se combinan las acciones de distintos behaviors (por ejemplo, mediante una red neural)



Ejemplo Comportamientos: Kompai+MARIO I

- Robot asistente Kompai (v3) con navegación láser, ojos animados, cámaras 3D/fisheye, pantalla táctil y marcha.
- Arquitectura software genérica propuesta por MARIO: Las capas deliberativas y automáticas están conectadas a través de un bus semántico con acoplamiento de información ligero (patrón 'publish/subscribe'). Define capacidades funcionales (o 'skills') que son reutilizadas por varios behaviors (P.Ej. face detection, person tracking, dialogue managing)

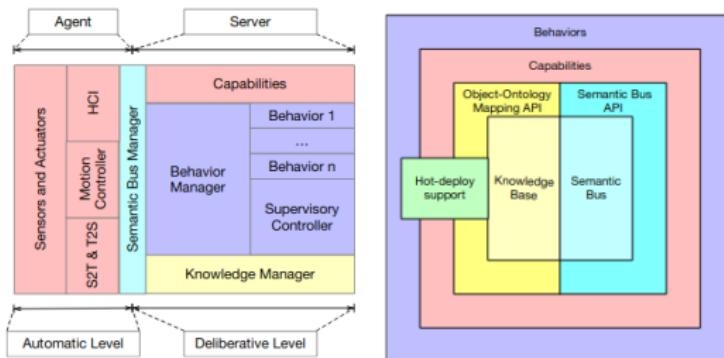


Figure 6: Arquitectura social de referencia MARIO [arXiv:2007.04933](https://arxiv.org/abs/2007.04933)

Ejemplo Comportamientos: Kompai+MARIO II

- Behavior manager: Usa información de la percepción y la base de información para decidir las acciones siguientes del robot.
- Hot-Deploy manager: Define los behaviors-capabilities a instalar en un robot en tiempo de ejecución.
- Knowledge base: Almacena información de los behaviors, actividades-preferencias de los usuarios y del entorno.

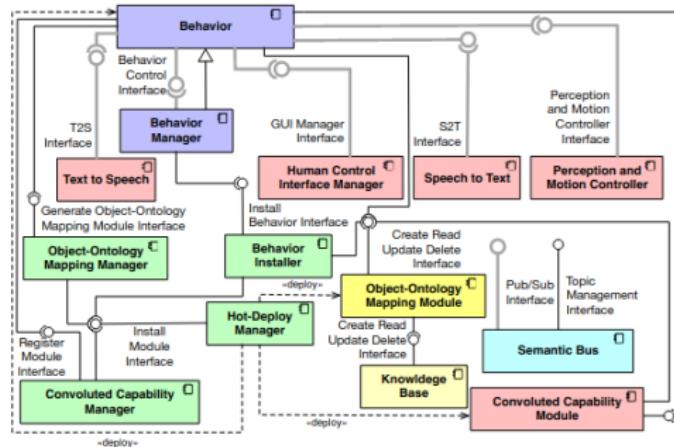


Figure 7: Módulos UML en la arquitectura MARIO [arXiv:2007.04933](https://arxiv.org/abs/2007.04933)

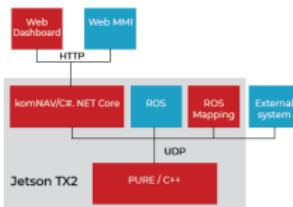
Ejemplo Comportamientos: Kompai III

- Librerías bajo nivel: API en C++ para acceso a motores, sensores y seguridad.
- Librerías de navegación: API con acceso HTTP y con ROS
- Desarrollo GUI para pantalla robot

DEVELOP YOUR OWN APPLICATION

KOMPAÏ IS DELIVERED WITH 4 FIRMWARE MODULES :

1. PURE, the low-level layer, controlling motors, sensors, security ...
2. komNAV, including localization, path planning, obstacle avoidance ...
3. a ROS Node for mapping
4. A complete dashboard running in any browser, for remote control and telepresence



THERE ARE 3 WAYS TO DEVELOP YOUR OWN SOFTWARE :

1. Completing the existing ROS node, and develop new ones, thanks to API to access komNAV and PURE
2. Install an external system (xtra PC) using UDP communication with the low level
3. Any external system (PC or tablet), using HTTP API to interface komNAV, where low-level functions are also exposed

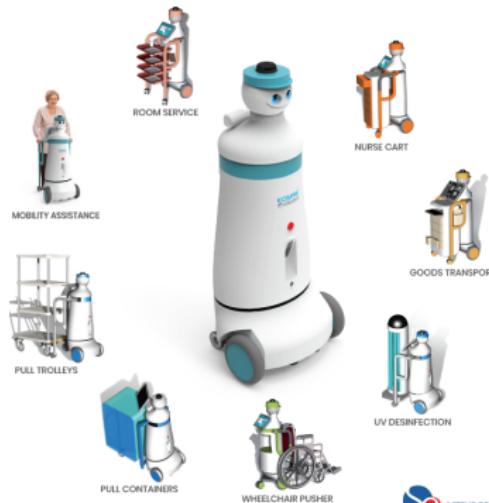


Figure 8: Servicios software robot Kompai v3

Arquitectura Motivada de Comportamientos (MBA)

- Las arquitecturas de comportamientos sólo tienen en cuenta la dinámica de la interacción con el entorno ('situatedness') pero no permiten representaciones y razonamientos abstractos.
- Motivación: Activación-configuración-monitorización de los behaviors para representar las intenciones del robot según 3 tipos:
 - Motivación instintiva: Operaciones básicas basadas en reglas simples sobre información sensorial (P.Ej. evitar obstáculos).
 - Motivación racional: Operaciones basadas en procesos cognitivos (P.Ej. navegación, planning de tareas).
 - Motivación emocional: Operaciones basadas en la interacción con otros agentes (P.Ej. tarea preferida por una persona).
- Tarea: Estructura de datos asociada a una configuración del entorno y la activación específica de uno o varios behaviors
 - Dynamic Task Workspace (DTW) : Componente entre los módulos motivacionales y los comportamientos. Suele representar la tareas en una estructura de árbol (relación entre tareas abstractas con tareas comportamentales). Las motivaciones pueden añadir/quitar tareas a través de él.

Ejemplo MBA: Spartacus 2005

- Motivaciones pueden añadir/cambiar tareas mediante solicitudes de modificación (m) y sugerencias de activación (rec) además de obtener datos (q) y eventos (e) de tareas.
- El módulo SNOW (System Know-How) actúa como adaptador entre los comportamientos (BPMs) y el DTW. Intercambia parámetros de tareas (p) y resultados de los behaviors (res).

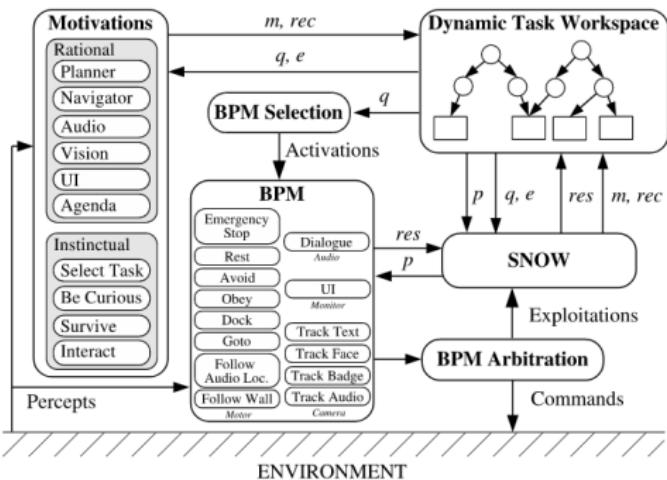


Figure 9: Spartacus: robot y MBA. DOI: [10.1007/s10514-006-9014-7](https://doi.org/10.1007/s10514-006-9014-7)

Emociones

- Las emociones son parte de la cognición social humana (favorecen supervivencia, mejoran vínculos sociales y minimizan rechazo social): los robots sociales deben ser capaces de interpretarlas y expresarlas.
- Las emociones permiten transmitir información sobre el estado afectivo interno del interlocutor al exterior:
 - Datos sobre el interlocutor y sus acciones futuras (P.Ej. la rabia podrá conllevar una respuesta agresiva posterior).
 - Datos sobre el entorno (P.Ej. el miedo avisa de peligros).
- Las emociones se transmiten desde 2 modos principales:
 - Expresiones faciales: Los músculos faciales se pueden agrupar por unidades de acción (AUs) cuyas combinaciones se asocian a emociones (FACS: Ekman's Facial Action Coding System).
 - Prosodia (entonación-velocidad) y movimientos corporales.

Upper Face Action Units						Lower Face Action Units					
AU 1	AU 2	AU 4	AU 5	AU 6	AU 7	AU 9	AU 10	AU 11	AU 12	AU 13	AU 14
Inner Brow Raiser	Outer Brow Raiser	Brow Lowerer	Upper Lid Raiser	Cheek Raiser	Lid Tightener	Nose Wrinkler	Upper Lip Raiser	Nasolabial Deepener	Lip Corner Puller	Cheek Puffer	Dimpler
*AU 41	*AU 42	*AU 43	AU 44	AU 45	AU 46	AU 15	AU 16	AU 17	AU 18	AU 20	AU 22
Lid Droop	Slit	Eyes Closed	Squint	Blink	Wink	Lip Corner Depressor	Lower Lip Depressor	Chin Raiser	Lip Puckerer	Lip Stretcher	Lip Fumeler
						AU 23	AU 24	*AU 25	*AU 26	*AU 27	AU 28
						Lip Tightener	Lip Pressor	Lips Part	Jaw Drop	Mouth Stretch	Lip Suck

Modelo emocional OCC

- Ortony, Clore & Collins definen 4 fases en su modelo:
 - Categorización: Se evalúa un evento, una acción o un objeto para dar información de las categorías de emociones.
 - Cuantificación: Intensidad de las categorías emocionales.
 - Interacción: Interacción con otros agentes.
 - Mapeo: Se definen 22 emociones

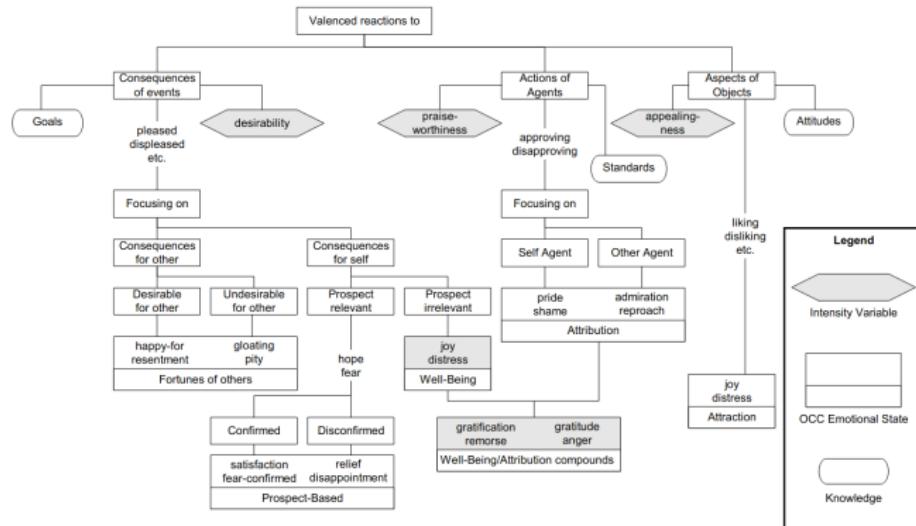


Figure 11: Modelo OCC. DOI: 10.1017/CBO9780511571299

Modelo emocional circumplejo de Russel

- Este modelo se representa en un círculo de 2 dimensiones donde se colocan todas las emociones:
 - Valence: Grado positivo o negativo de la emoción
 - Arousal: Intensidad de la emoción
- Problema: Coloca el 'enfado' y el 'miedo' juntos mientras que son emociones diferentes. Se necesita una dimensión más.



Figure 12: Modelo Russel. DOI: 10.1037/h0077714

Modelo emocional PAD

- Este modelo tiene tres dimensiones para definir las emociones:
 - Pleasure-Valence (P): Mide lo placentero o desagradable que se siente uno sobre algo. P. Ej. 'enfado'/'miedo' son desagradables mientras que 'alegría' es positivo.
 - Arousal (A): Mide lo energético o soporífero que se siente uno sobre algo. P. Ej. 'rabia' tiene más energía que 'enfado'.
 - Dominance (D): Mide lo controlador/dominante o controlable/sumiso que se siente uno sobre algo. P.Ej. 'enfado' es dominante mientras que el 'miedo' es sumiso.

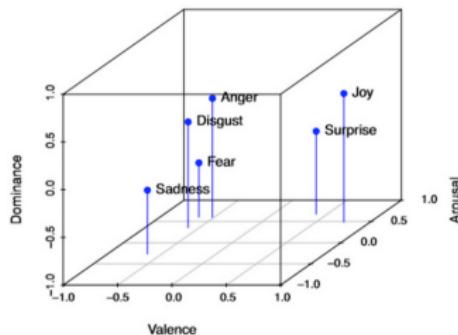
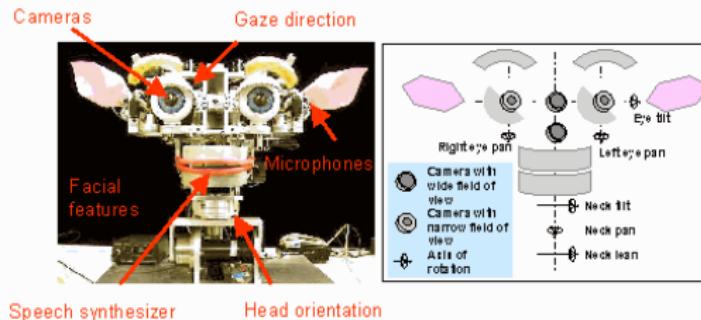


Figure 13: Modelo PAD.

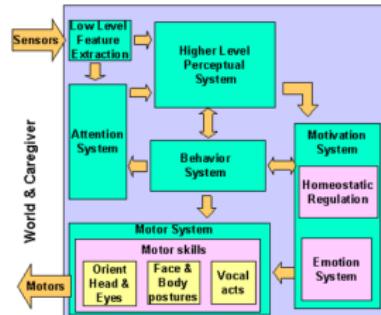
Ejemplo Kismet: Hardware

- La cabeza robótica Kismet del MIT está compuesta por:
 - Sistema de visión: 4 cámaras (centrales+pupilas) instaladas sobre una cabeza estéreo activa (3 dof mirada y 3 dof cuello).
 - Sistema auditivo: Incluye micrófonos para detectar las emociones del humano en su prosodia.
 - Sistema expresivo de emociones: La cara tiene 15 dof para mostrar expresiones faciales que reflejan el estado emocional del robot y ayudan a la comunicación. Las orejas, cejas, párpados, lábios y mandíbula tienen motores.
 - Sistema de vocalización: Incluye un algoritmo de control de los labios y un sintetizador de voz software (DECtalk) capaz de mostrar emociones (tono, temporización, articulación...).



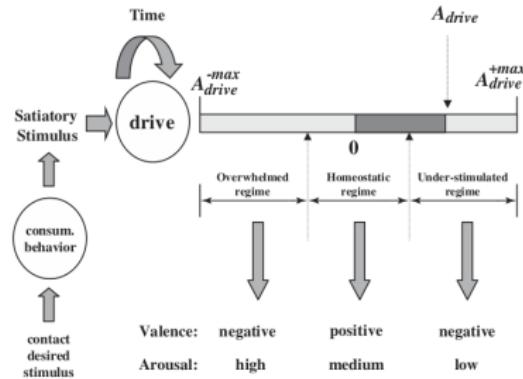
Ejemplo Kismet: Arquitectura Software

- Extracción de características bajo nivel (del sensor).
- Percepción de alto nivel (percepts).
- Sistema de atención: Determina los estímulos más salientes.
- Sistema de motivación: Mantiene el robot en un estado de bienestar (regulación homeostática+emociones)
- Sistema de comportamientos: Arbitraje entre behaviors competidores para definir la tarea actual (objetivo). Un robot tiene muchos comportamientos y varias motivaciones que saciar por lo que sus objetivos cambian con el tiempo.
- Sistema motor: Ejecuta los objetivos mediante modalidades de salida (tareas físicas y señales sociales).



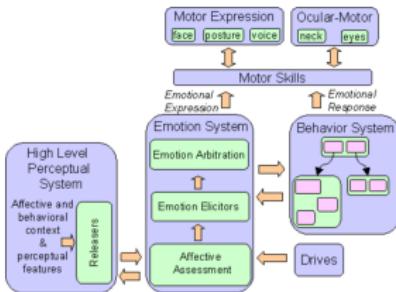
Ejemplo Kismet: Regulación Homeostática

- Motivación instintiva: Mantiene 3 parámetros en un intervalo de equilibrio mediante una estrategia cíclica ('drive') para responder a las necesidades. Con un estímulo saciador bajo, el drive estará en régimen infra-estimulado. Con un estímulo saciador intenso, el drive estará en régimen abrumado:
 - Drive social: Busca la interacción con humanos. Si infra-estimulado, se siente solo y busca interacciones.
 - Drive de Estimulación: Busca la estimulación con un juguete de color. Si abrumado, cierra sus ojos o mira a otro lado.
 - Drive de Fatiga: Cuando el robot está cansado, duerme y devuelve los otros drives al estado homeostático.



Ejemplo Kismet: Componentes para las Emociones

- Releaser: Combinación de detectores de características que identifican las condiciones de percepción para activar una respuesta con una emoción y/o un comportamiento.
- Emoción: Conjunto de funciones que establecen una relación deseada entre el robot y su entorno para su bienestar.
- Evaluación afectiva: Cada releaser activo se etiqueta con marcadores arousal/valence/stance. Los comportamientos y drives también pueden enviar influencias.
- Elicitador (Estimulador): Calcula la relevancia de su emoción según las aportaciones de cada dimensión AVS y su nivel de activación. Un proceso final de arbitraje seleccionará la emoción con mayor nivel de activación y su comportamiento.



Ejemplo Kismet: Emociones a través la Arquitectura

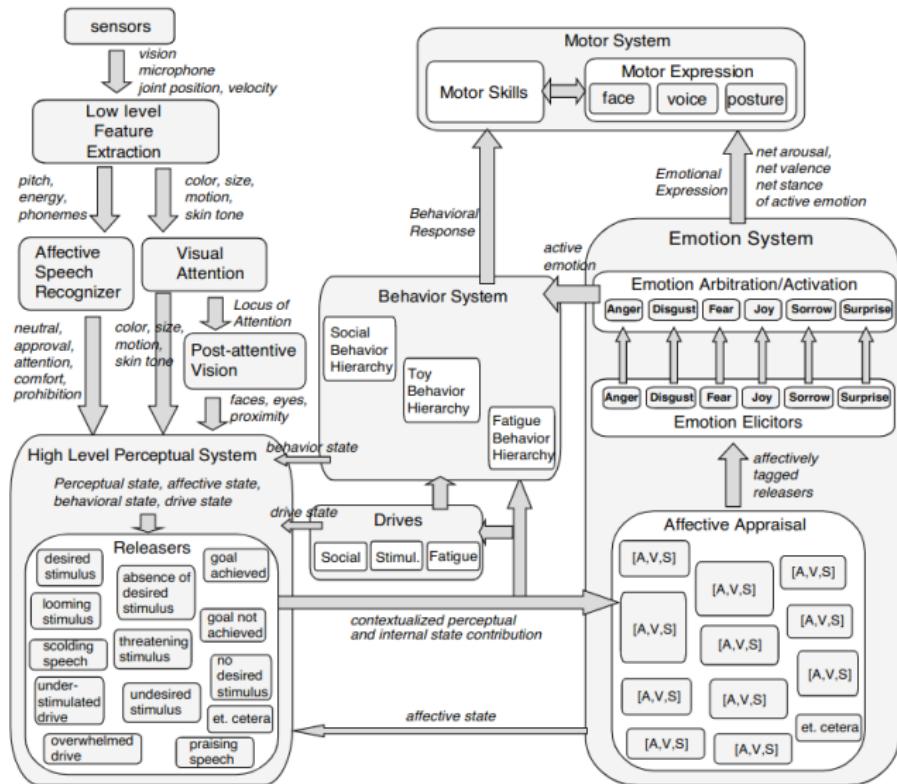
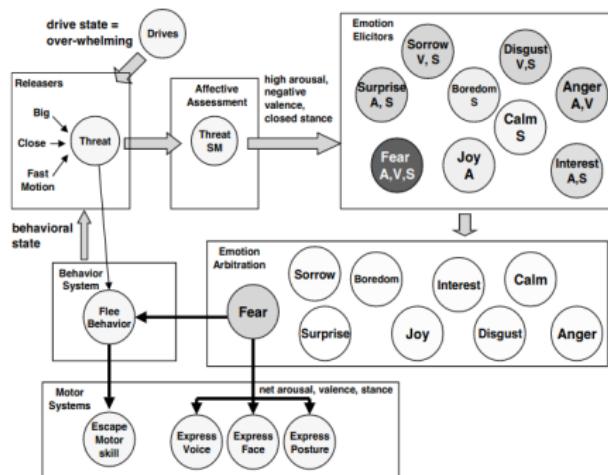


Figure 16: Emociones en la arquitectura cognitiva Kismet

Ejemplo Kismet: Ejemplo Respuesta Emocional de Miedo

- Activación: Para cada una de las 9 emociones gestionadas, se calcula un nivel de activación que incluye 2 aspectos:
$$A_{emotion} = E_{emotion} + B_{emotion} + P_{emotion} - \delta_t$$
- Importancia de la emoción según el contexto (percepción) y estados (behavior-drive) actuales: la activación por su elicitor ($E_{emotion}$) y un offset para facilitar su activación ($B_{emotion}$).
- Evolución temporal: persistencia cuando está activa ($P_{emotion}$) y reducción progresiva con el paso del tiempo (δ_t).



Ejemplo Kismet: Sistema Motor con Expresiones faciales

- Sus expresiones faciales se basan en la interpolación dentro de un espacio 3D de emociones ('Dominance'-Dominio se sustituye por 'Stance'-Postura) con 9 posiciones básicas.
- Utiliza un modelo simplificado de FACS para relacionar elementos faciales con sus componentes emocionales (pleasure-valence, attentional activity-arousal, personal agency-stance e intensidad-cercanía a los extremos). P.Ej. Al aumentar la valencia positiva, los labios se doblan hacia arriba, la boca se abre y las cejas se relajan.

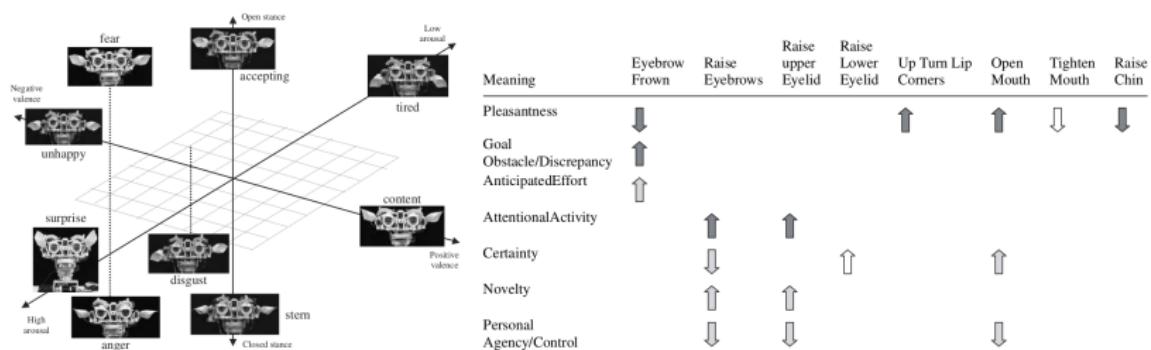


Figure 18: Modelo emocional (izq) y mapeado facial (der) en Kismet

Ejemplo Kismet: Sistema Motor con Vocalización emocional

- Las emociones alteran los parámetros de la vocalización (tono, velocidad, calidad y articulación).
- Cada parámetro vocal emocional (VAP=Vocal Affect Parameter) se relaciona con varios parámetros del sintetizador.

	Fear	Anger	Sorrow	Joy	Disgust	Surprise
Speech Rate	Much Faster	Slightly Faster	Slightly Slower	Faster or Slower	Very Much Slower	Much Faster
Pitch Average	Very Much Higher	Very Much Higher	Slightly Lower	Much Higher	Very Much Lower	Much Higher
Pitch Range	Much Wider	Much Wider	Slightly Narrower	Much Wider	Slightly Wider	Much Wider
Intensity	Normal	Higher	Lower	Higher	Lower	Higher
Voice Quality	Irregular Voicing	Breathy Chest Tone	Resonant	Breathy Blaring	Grumbled Chest Tone	Chest Tone
Pitch Changes	Normal	Abrupt on Stressed Syllable	Downward Inflections	Smooth Upward Inflections	Wide Downward Terminal Inflections	Rising Contour
Articulation	Precise	Tense	Slurring	Normal	Normal	

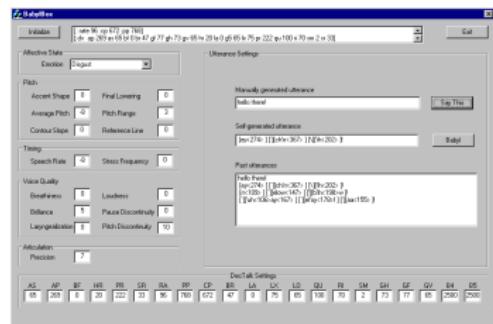
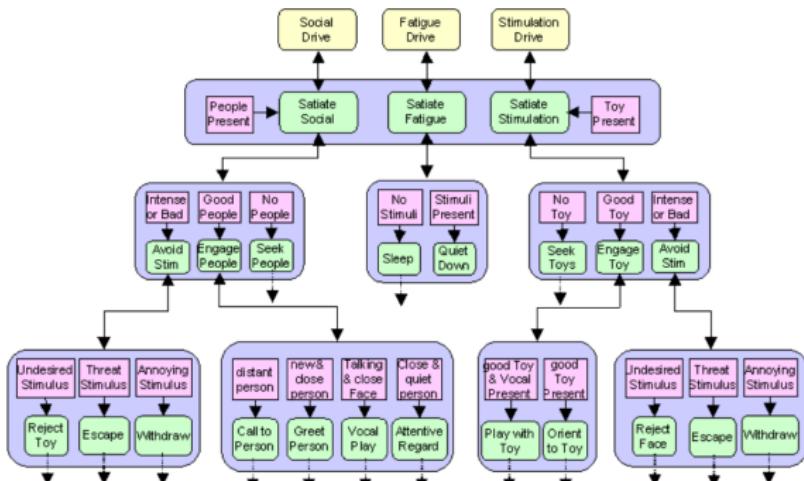


Figure 19: Parámetros VAP y mapeo en el sintetizador

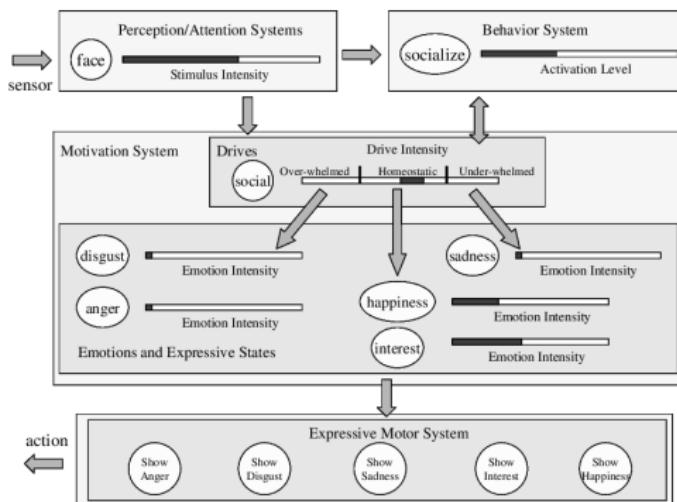
Ejemplo Kismet: Organización de los Comportamientos

- Organizados en tres ramas para atender las necesidades del robot (social/fatiga/juego) y en varios niveles:
- Nivel 0 (funcional): El comportamiento busca saciar el drive con mayor necesidad (activación A_{drive}) según el contexto.
- Nivel 1 (regulación): Buscan una buena intensidad de interacción con el entorno (buscar/evitar/involucrar).
- Nivel 2 (protección/juego): Gestionan una situación desagradable o el desarrollo de juegos interactivos.



Ejemplo Kismet: Circuito Estímulo-Emoción-Acción

- Hay 2 niveles de activación para las acciones de una emoción:
 - Expresión facial: Se activa primero para corregir la interacción.
 - Comportamiento: Se activa después de la expresión facial.
- Cada drive está conectado con su behavior saciador:
 - Cuando el drive aumenta en intensidad (under-estimulated), potencia el nivel de activación de su behavior saciador.
 - Cuando el comportamiento saciador se activa, la intensidad del drive se reduce progresivamente hasta el nivel homeostático.



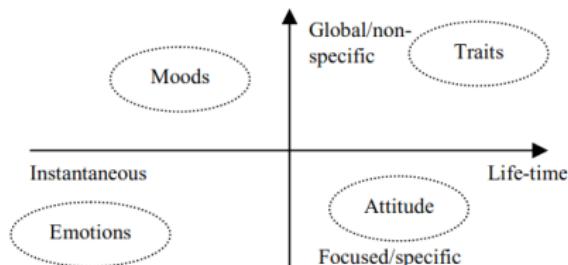
Ejemplo Kismet: Respuestas emocionales proto-sociales

La arquitectura Kismet cognitiva-emocional busca reproducir los intercambios entre niños y cuidadores a través de la regulación de las emociones y su expresión mediante respuestas proto-sociales.

Antecedent Conditions	Emotion	Behavior	Function
Delay, difficulty in achieving goal of adaptive behavior	anger, frustration	display-displeasure	Show displeasure to caregiver to modify his/her behavior
Presence of an undesired stimulus	disgust	withdraw	Signal rejection of presented stimulus to caregiver
Presence of a threatening, overwhelming stimulus	fear, distress	escape	Move away from a potentially dangerous stimuli
Prolonged presence of a desired stimulus	calm	engage	Continued interaction with a desired stimulus
Success in achieving goal of active behavior, or praise	joy	display-pleasure	Reallocate resources to the next relevant behavior (eventually to reinforce behavior)
Prolonged absence of a desired stimulus, or prohibition	sorrow	display-sorrow	Evoke sympathy and attention from caregiver (eventually to discourage behavior)
A sudden, close stimulus	surprise	startle	Alert
Appearance of a desired stimulus	interest	orient	Attend to new, salient object
Need of an absent and desired stimulus	boredom	seek	Explore environment for desired stimulus

Componentes de la Personalidad

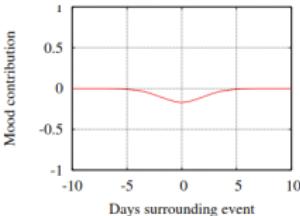
- Emociones: Respuesta afectiva a la evaluación de un evento (con estímulos específicos).
- Estado de ánimo (mood): Estado afectivo más difuso debido a varios antecedentes anteriores, con una intensidad menor que las emociones pero más estable a lo largo del día.
- Actitud (attitude): Amalgama de emociones experimentadas con una persona particular. Reflejan la relación con esa persona a lo largo del tiempo y predisponen a ciertos comportamientos específicos hacia ella.
- Rasgos personalidad (trait): Generados a partir de experiencias tempranas y son muy estables en el tiempo.



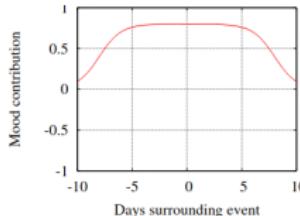
Ejemplo 1 Roboceptionist: Estado de ánimo

- **Roboceptionist:** Proyecto de Carnegie Mellon para crear un recepcionista robótico para un hotel. Está compuesto por un robot móvil RWI B21r con una pantalla como cabeza en la que se proyecta un agente virtual (Valerie o Tank). [Vídeo](#).
- Estado de ánimo: Se calcula de manera diaria. Un evento que ocurrirá en d días contribuye antes y después de su ocurrencia, teniendo su máximo (valor m) el día de ocurrencia. Dicha contribución (valor c) sigue una función sigmoide y perdura más en el tiempo cuanto mayor sea su intensidad (m):

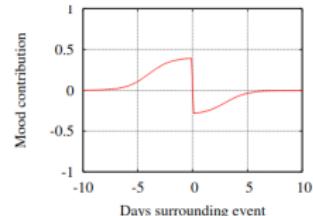
$$c = m - \frac{m}{1 + e^{-|d|+|10m|}}$$



(a) Impending dentist visit ($m = -0.2$)



(b) Visit from a close friend ($m = 0.8$)



(c) Blind date that went badly (anticipated $m = 0.4$, actual $m = -0.3$)

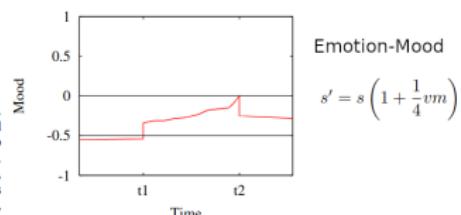
Ejemplo 1 Roboceptionist: Mood-emotion-attitude

- Emotion: Se realiza un escalado lineal de la respuesta emocional según el estado anímico actual m . Las emociones congruentes con el mood (con valencia $v = \pm 1$ similar) incrementan su intensidad s ($0 \leq s \leq 1$) mientras que las incongruentes la disminuyen. La ejecución de emociones positivas-negativas podrán añadir un offset al mood diario.
- Attitude: La actitud con respecto a una persona (A_m) es un mood de largo plazo. Se actualiza mediante la familiaridad con ella A_f (máxima cuando se interaccione más de 10 horas y el último día de interacción sea hoy) y el incremento de dicha actitud (Δm_0) a medida que se interacciona positivamente con ella.
- Trait: offset del mood, escalado behaviors y familiaridad.

$$A_f = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{10} \min(\text{hours}, 10) - \frac{1}{30} \min(\text{days}, 30) \right) \text{ Attitude-Mood}$$

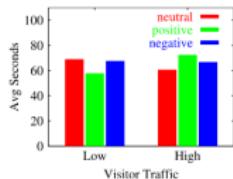
$$A'_m = A_m + (\Delta m_0 \text{ during interaction})(1 - A_f)$$

An example of how attitude and interactions influence mood. Here, the baseline mood is -0.5 , and a previous interaction has lowered the mood even further. A well-liked person ($A_m = 0.4$) approaches to begin interaction at time $t1$, which immediately improves the robot's mood. The person interacts from $t1$ to $t2$, largely trying to cheer up the robot, improving its mood considerably. When the person leaves, the mood drops once again, but remains at a higher level than before. After the interaction, the mood begins to decay toward the baseline.



Ejemplo 1 Roboceptionist: Evaluación

- Pruebas exhaustivas: 2679 interacciones con clientes humanos durante 9 semanas con 3 moods diferentes (neutro, positivo y negativo) en la expresión facial del robot. Se recogieron 123 encuestas sobre las opiniones de los usuarios.
- Resultados: Las personas pudieron identificar los moods del robot. Las personas encontraron al robot positivo más natural y por ello su interacción fue más eficiente (y duró menos tiempo). Influyeron en la interacción aunque de manera distinta cuando hubo alta/baja asistencia de participantes:
 - Baja asistencia (más conocimiento del robot): Interaccionaron más tiempo con el robot positivo y menos con el negativo.
 - Alta asistencia (menos conocimiento del robot): Interaccionaron menos tiempo con el neutro. Al desconocer el robot, el mood negativo tiene más "expresividad" que el "neutro" lo que lleva a una interacción más larga.



The three expressions used to test the effect of the robot's mood: neutral, positive, and negative (left to right). Differences include eyebrow and eyelid positions, mouth shape, and head angle.

Ejemplo 2 WE-4RII: hardware

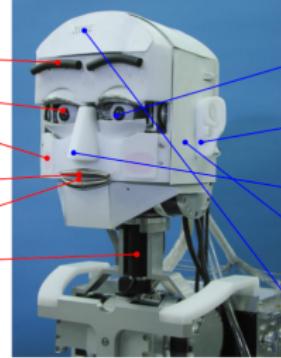
- **WE-4RII (Waseda Eye No.4 Refined II)**: Robot humanoide (cabeza con expresiones faciales, torso y brazos) con 59 dofs y una gran cantidad de sensores multimodales: visión (2 cámaras CCD en los ojos), audición (2 micrófonos y sintetizador de voz LaLaVoice 2001 de Toshiba), táctiles (sensores FSR en la cara y las manos), olfativos (sensor de gas para detectar alcohol/amoníaco/tabaco) y térmicos.
- Es capaz de representar las **seis emociones básicas** de Ekman (Happiness, Anger, Disgust, Fear, Sadness, Surprise y Neutral) combinando expresiones faciales y movimientos de los brazos.



Part	DOF
Neck	4
Eyes	3
Eyelids	6
Eyebrows	8
Lips	4
Jaw	1
Lung	1
Waist	2
Arms	18
Hand	12
Total	59

Expressions

- Eyebrows
- Eyelids
- Facial Color
- Lips
- Voice
- Neck
- Waist
- Lung(Breath)

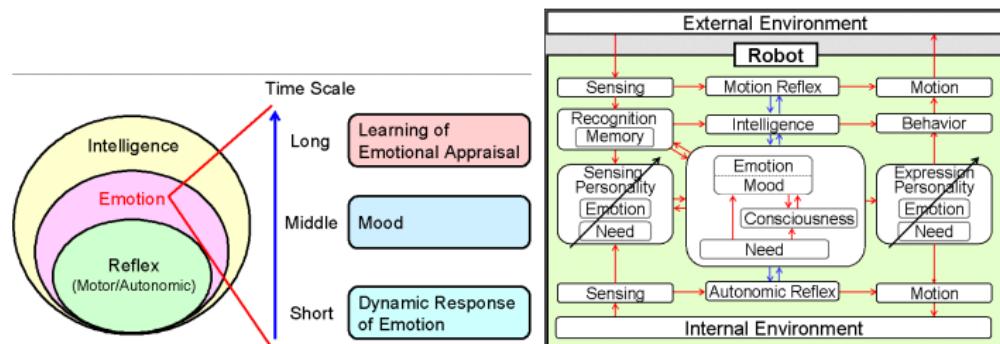


Sensors

- Visual (CCD Camera)
- Auditory (Microphone)
- Olfactory (Gas Sensor)
- Tactile (FSR)
- Temperature (Thermistor)

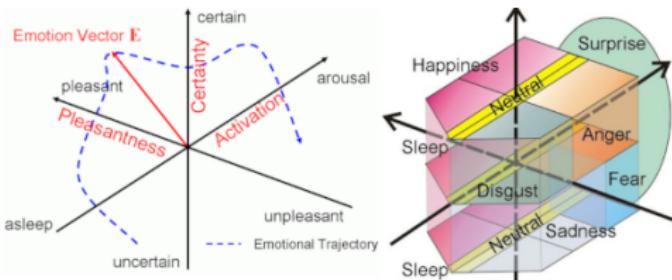
Ejemplo 2 WE-4RII: Modelo mental

- Modelo mental basado en la dinámica del cerebro humano (transiciones mentales debidas al estado interno del robot y al estado externo del entorno) y organizado en 3 niveles:
 - Reflejos: Reacciones automáticas motoras a un estímulo
 - Emociones: Se subdividen en tres componentes según su duración (respuesta dinámica, mood- estado de ánimo- y aprendizaje de la evaluación de emociones)
 - Inteligencia: Reconocimiento del entorno e inferencia
- Tiene 2 flujos: uno del entorno externo y otro del estado interno del robot. Incluye la personalidad del robot, emociones y necesidades (más bajo nivel).



Ejemplo 2 WE-4RII: Ecuación dinámica de emociones

- Se fundamenta en un modelo 3D de las emociones, donde el vector de emoción $E = (E_p, E_a, E_c)$ se asocia a una emoción básica según su región espacial
- Las transiciones del estado mental se modelizan mediante un sistema de 2º orden (equivalente a un sistema físico masa-resorte-amortiguador) que relaciona la trayectoria emocional (vector E) con los efectos totales F_{EA} de los estímulos internos y externos en el estado mental
- El cambio de las matrices de coeficientes de la ecuación permite cambiar la dinámica de las transiciones mentales (reacciones lentas, oscilatorias...).



Equations of Emotion

$$M\ddot{E} + \Gamma\dot{E} + KE = F_{EA}$$

E: Emotion Vector, F_{EA} : Emotional Appraisal
Emotional Coefficient Matrix

M : Emotional Inertia Matrix
Γ : Emotional Viscosity Matrix
K : Emotional Elasticity Matrix

Ejemplo 2 WE-4RII: Modelo estado anímico

- El estado anímico M representa un cambio gradual a lo largo del tiempo y se representa con un vector de 2 componentes:
 - M_p (componente de agrado-pleasantness-): Integral de la componente de agrado de la emoción E_p
 - M_a (componente de activación): Representa el ritmo biológico diario humano (circadiano), similar a un reloj interno representado por la ecuación del oscilador de Van del Pol.
- Los efectos totales sobre el estado mental serán función del estado anímico y de la personalidad sensorial P_s :

$$F_{EA} = f(M, P_s) = k_m \cdot M + P_s$$

$$M = (M_p, M_a, 0),$$

$$M_p = \int E_p dt,$$

$$\ddot{M}_a + (1 - M_a^2) \dot{M}_a + M_a = 0,$$

Ejemplo 2 WE-4RII: Personalidad sensorial

- La personalidad sensorial P_s (sensing personality) representa mediante una tabla la influencia de un estímulo (interno o externo) en el estado mental del robot:

Sensing Personality

$$P_s = f_{PS}(S_t, I_t)$$

$$S_t = (S_{Vt}, S_{At}, S_{Tt}, S_{Ht}, S_{Ot})$$

$$P_s = (P_{SP}, P_{SA}, P_{SC})$$

Stimuli

S_{Vt} : Visual Sensation

S_{At} : Auditory Sensation

S_{Tt} : Tactile Sensation

S_{Ht} : Heat Sensation

S_{Ot} : Olfactory Sensation

I_t : Internal Stimuli

Stimulus	Sensation	Δa	Δp	Δc
Visual	Loose Sight of the Target	-	-	-
	Discover the Target	+	0	+
	Dazzling Light	+	-	0
	Target is Near	+	-	0
	Pushed	+	0	0
Tactile	Pushed Strongly	+	-	0
	stroked	+	+	0
	Hit	+	-	0
	Loud Sound	+	0	0
Auditory	Heat	0	-	0
	Alcohol	-	+	0
	Ammonia	+	-	0
	Cigarette Smoke	+	-	0
	No Sense	-	$\rightarrow 0^*$	0
No Stimulus		-	$\rightarrow 0^*$	0

* " $\rightarrow 0$ " means to converge at "0"

Figure 20: Personalidad sensorial: DOI: 10.1109/IROS.2003.1248840

Ejemplo 2 WE-4RII: Personalidad expresiva

- La matriz de personalidad expresiva P_E (expression personality) de tamaño 7x7 determina la expresión facial y el comportamiento que el robot expresa E_o a partir de su estado emocional actual E_i : $E_o = P_E \cdot E_i$

$$\begin{bmatrix} E_o \\ E_o \\ E_o \\ E_o \\ E_o \\ E_o \\ E_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ E_i \\ E_i \\ E_i \\ E_i \\ E_i \\ E_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Hide \\ one's Emotion \\ Express \\ one's Emotion \\ No Anger \\ Always \\ Happiness \end{bmatrix}$$

Matrices involved:

- E_o (7x1): Neutral, Surprised, Happiness, Sadness, Anger, Fear, Disgust
- E_i (7x1): Neutral, Surprised, Happiness, Sadness, Anger, Fear, Disgust
- P_E (7x7):
 - Row 1: Hide one's Emotion (0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5)
 - Row 2: Express one's Emotion (2, 2, 2, 2, 2, 2, 2)
 - Row 3: No Anger (1, 1, 1, 0, 1, 1, 1)
 - Row 4: Always Happiness (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
- E_i (7x7):
 - Row 1: High Extroversion (1.0, 1.0, 1.5, 0.8, 1.0, 0.8, 0.8)
 - Row 2: High Agreeableness (1.0, 1.0, 2.0, 0.8, 0.5, 1.0, 0.5)
 - Row 3: High Openness (1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)
 - Row 4: Low Extroversion (1.0, 0.5, 0.5, 1.5, 0.5, 1.5, 0.5)
 - Row 5: Low Agreeableness (1.0, 1.5, 0.5, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0)
 - Row 6: Low Openness (1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2)

Figure 21: Personalidad expresiva: DOI: 10.1109/IROS.2003.1248840

Ejemplo 2 WE-4RII: Modelo de necesidades

- Se añade un modelo temporal de las necesidades internas del robot: $N_{t+\Delta t} = N_t + P_N \cdot \Delta N$. Siendo P_N la matriz 3x3 de personalidad de necesidades y ΔN las pequeñas variaciones de la necesidad debido a estímulos internos/externos.
- Se fundamenta en el modelo de A.H. Maslow e incluye tres componentes $N = [N_A, N_S, N_E]$:
 - N_A (Apetito): Representa la energía consumida total y se obtiene a partir de la suma de la energía del metabolismo basal (basada en el estado emocional del robot) y la energía de salida (estímulos internos/externos).
 - N_S (Seguridad): Cuando el robot siente un estímulo peligroso (demasiado cercano/intenso) durante un largo período de tiempo, genera un comportamiento de defensa.
 - N_E (Exploración): Representa la curiosidad humana/animal para explorar nuevas situaciones/objetos.
- **Influencia en el comportamiento y el estado mental:** El robot genera un comportamiento para satisfacer cada necesidad. Cada necesidad es un estímulo interno que se asigna a la personalidad sensorial para influir en su estado mental.

Abilidades socio-cognitivas: Theory of Mind

- Theory of Mind (ToM): Capacidad de reconocer, comprender y predecir el estado mental de otras personas (creencias, deseos, intenciones y emociones). Permite 3 funcionalidades:
 - Comprender el significado del comportamiento y acciones de los demás motivados por su estado mental
 - Predecir el comportamiento de los demás para actuar de manera acorde a su estado mental
 - Influenciar el comportamiento de los demás controlando la información disponible para ellos
- Se fundamenta en 2 modelos:
 - Theory-theory (TT): La comprensión de la mente del otro se basa en la inferencia de reglas (innatas o aprendidas). Estas reglas suponen una teoría (conocida como 'folk psychology') para comprender y predecir las intenciones de los otros.
 - Simulation Theory (ST): Se basa en el uso del aparato mental propio para ponerse en el lugar de la otra persona y simular su estado mental (y así predecir sus intenciones).

Herramientas de la ToM

- ToM es un conjunto de herramientas cuya complejidad se muestra en un triángulo. Los niños desarrollan las más sencillas, automáticas y menos evolucionadas entre los 6-12 meses (parte inferior) y las más complejas durante los 3-5 años (parte superior).

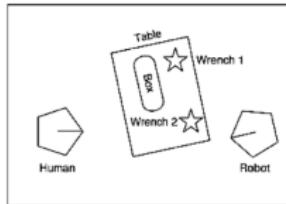


- El mapeado entre estados mentales similares a través de acciones corporales similares permite a los humanos adquirir intuiciones sobre los estados mentales de los demás.
- Empatía emocional: Cuando una persona representa una cierta expresión facial emocional, dicha expresión provoca el sentimiento correspondiente a dicha emoción. Así, cuando un niño imita las expresiones faciales de otros, aprende a asociar la expresión emotiva observada con su propio estado afectivo interno. Las señales multimodales sincronizadas facilitan el aprendizaje de dicho mapeado (por ejemplo, un habla afectiva que acompaña expresiones faciales emotivas).
- Ejemplo: El robot 'Eddie' obtiene una mayor implicación del humano con el que está interaccionando al imitar el estado anímico (con su voz y expresión facial) del humano: DOI: [10.1109/IROS.2012.6385941](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385941) Vídeo

- La atención compartida es un comportamiento social-comunicativo en el que dos personas se focalizan en un objeto o evento con el objetivo de interaccionar juntos.
- Se consigue mediante una combinación de miradas, gestos y otras señales verbales/no-verbales focalizadas en un objeto-evento. Por ejemplo, una persona mira a otra, señala un objeto y vuelve su mirada a la persona.
- Los niños la aprenden observando, de manera alternativa y repetitiva, el nuevo objeto y la reacción emotiva del adulto hacia dicho objeto.
- Los robots la implementan teniendo en cuenta dos elementos: el foco actual de la atención (objeto en cuestión) y el foco de referencia (el tema evocado por el objeto). El robot mantiene dos modelos del estado de atención: propio y del humano.
- Ejemplo: El robot humanoide Kaspar se fundamenta en captar y mantener la atención de niños con autismo con fines terapéuticos: [DOI: 10.1007/s12369-019-00563-6](https://doi.org/10.1007/s12369-019-00563-6) Vídeo

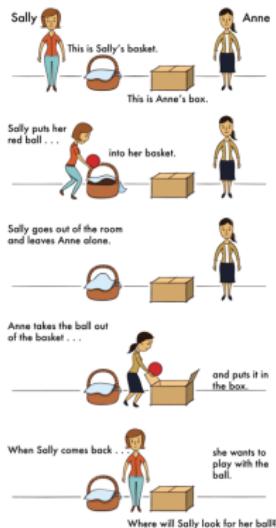
ToM: Perspectiva Visual

- El robot es capaz de representar la perspectiva visual-espacial del humano para mejorar tareas de interacción humano-robot:
 - Implementar juegos donde es fundamental conocer la perspectiva visual del oponente. Ejemplo: [humanos y robots juegan al escondite](#)
 - Recibir órdenes del humano con diferentes puntos de vista (ego-céntricas: 'dame el cono que está a mi derecha'; centradas en el destinatario: 'dame el cono que está a tu derecha'; centradas en el objeto: 'dame el cono que está al lado de la caja'). Ejemplo:[DOI 10.1109/TSMCA.2005.850592](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2005.850592)
 - Resolver ambigüedades al interaccionar con el humano. Ejemplo: El robot Robonaut descarta una herramienta ocluida para un humano cuando éste pide que le pase una llave [Vídeo](#)



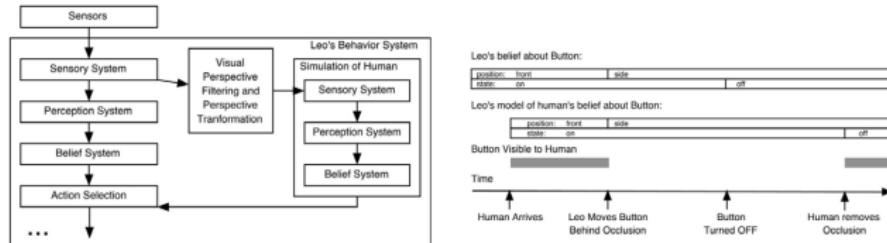
ToM: Inferencia de Creencias/Objetivos

- El nivel más alto en ToM corresponde a la inferencia del estado mental de otras personas (que puede contener creencias y objetivos) para desarrollar tareas colaborativas.
- Falsas creencias: test de Sally-Anne para detectar cuando los niños son capaces de inferir el estado mental de otra persona (generalmente a partir de los 4 años):
 - ¿Dónde buscarán Sally-Anne la pelota?



ToM: Inferencia de Creencias en Leonardo

- El robot Leonardo ([vídeo](#)) utiliza la ST, implementando un modelo doble (de sus propias creencias y las del humano).
- El robot es capaz de comparar su propio estado interno con el estado de la persona para inferir su estado mental.
- También dispone de un sistema de atención compartida basada en el cálculo de su propio foco de atención (objetos salientes en el entorno hacia los que mira el robot) y el foco de atención del humano (seguimiento de la mirada del humano). Mediante un sistema de votación determina el foco de referencia (objeto de interés común) según el tiempo durante el que el humano/robot miran a cada objeto.



ToM: Resolución de Falsas Creencias con Leonardo

- La simulación del estado mental del humano permite resolver conflictos en el aprendizaje de tareas a través de demonstraciones humanas incluso con falsas creencias.

TRIAL 1	TRIAL 2	CONFLICT RESOLUTION
<p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>H: "Leo, turn the buttons on." L: shrugs, confused face H: "I can teach you. Watch me." L: confirming head nod H: Presses the green button ON L: Watches demonstration. H: "Now the buttons are on."</p> <p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>L: Confirming nod; Forms the following representations of the human's schema and his own:</p> <p>Human's: E = press G1: this one button, G2: any green button, G3: any button we both see</p> <p>Leo's: E = [press] [G1: this one button, G2: any green button, G3: any button we both see]</p> <p>Most specific schema is the same for both and is selected as the primary hypothesis: [press] [this one button]</p>	<p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>H: "Can you turn the buttons on?" L: nods yes, presses green button, perks ears for feedback</p> <p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>H: "Not quite..." L: expects more instruction following negative feedback H: "We need to press this one, too." Presses red button. L: Observes refinement H: "Now the buttons are on."</p> <p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>L: Confirming nod; Recalculates most specific schema given these two examples, and finds conflict:</p> <p>Human's: E = [press] G = [any button]</p> <p>Leo's: E = [press] G = [any button we can both see]</p> <p>CONFFLICT</p>	<p>L: Noting the conflict, sees that using the human's goal from his perspective there are two objects unfinished, queries human by pointing to one of them.</p> <p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p> <p>H: "Oh, Yes, we need that one, too." Takes down barrier and presses button.</p> <p>L: Confirming head nod, now knows most specific shared schema is E = [press] G = [any button]</p> <p>Finishes task, pressing last button.</p> <p>H: Seeing this action, human also takes down the second barrier to reveal all four buttons on, says "Good job!"</p> <p>L: Confirming head nod</p> <p>HUMAN</p> <p>ROBOT</p>

Figure 22: Aprendizaje de la tarea E ('turn all the buttons on') mediante los objetivos G del robot-humano. DOI: 10.1016/j.robot.2006.02.004