

EMERGENCIA Y TRANSFERENCIA DE COMUNICACIÓN SEMÁNTICA EN ROBÓTICA COLECTIVA

Álvaro Gutiérrez Martín

Laboratorio de Robótica y Control
ETSI Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid
a.gutierrez@upm.es
www.robolabo.etsit.upm.es/aguti

Emergencia y Transferencia de Comunicación Semántica en Robótica Colectiva

- La comunicación es un pilar fundamental en robótica colectiva
- La creación y emergencia de una comunicación entre robots:



- debe poder ser creada/evolucionada por los robots
- debe ser independiente de la tarea
- debe superar un simple “signalling”
- debe poder transferir la semántica
- debe poder ser adoptada por un colectivo de robots

Índice

- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 Transferencia y Emergencia
 - Comunicación transferible
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 Transferencia y Emergencia
 - Comunicación transferible
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

Robótica de Enjambre

Swarm Robotics

La robótica de enjambre es un campo de la robótica que estudia el uso de un conjunto de **robots simples** que cooperan con el fin de resolver **tareas complejas**.

Los sistemas de robótica de enjambre deben cumplir las siguientes características:

- Autonomía
- Gran número de robots
- Homogeneidad
- Robots simples e ineficientes
- Comunicación y percepción local



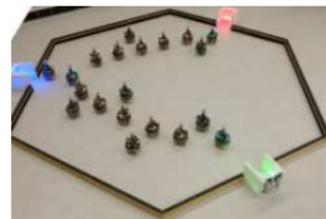
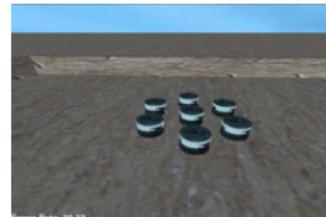
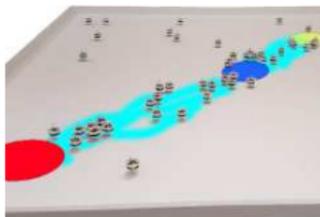
Robótica de Enjambre

- Transporte colectivo
- Movimiento colectivo
- Recolección
- Formaciones
- Construcción de nidos
- Reparto de tareas



Robótica de Enjambre

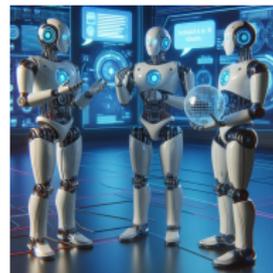
- Transporte colectivo
- Movimiento colectivo
- Recolección
- Formaciones
- Construcción de nidos
- Reparto de tareas



Comunicación

En el contexto de la robótica colectiva, distinguimos:

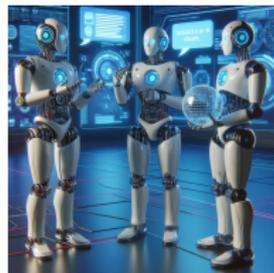
- Comunicación a través del entorno (Estigmergia)
- Comunicación a través del estado
- Comunicación directa



Comunicación

En el contexto de la robótica colectiva, distinguimos:

- Comunicación a través del entorno (Estigmergia)
- Comunicación a través del estado
- **Comunicación directa**



Distinguimos dos tipos de comunicación directa:

- **Abstracta:** toda la información reside en el mensaje
- **Situada:** el contexto del entorno es necesario para entender el mensaje

Comunicación emergente

El **léxico** y la **semántica** deben emerger de un proceso evolutivo

Contexto

SIN EMBARGO ...

- Más allá de una simple señalización, no hay trabajos que consigan una evolución de **comunicación semántica** en enjambres de robots
- Con carácter general, **la comunicación depende de la tarea**
- No hay una **estructura** de comunicación **estandarizada**
- Generalmente:
 - No podemos **generalizar** la comunicación emergente **entre tareas**
 - No podemos **trasladar** la comunicación emergente **entre individuos**
 - En el caso de superar la señalización, nos encontramos con el **Problema del Anclaje del Símbolo** y quien otorga el significado de lo comunicado en el robot

Es imperativo resolver estas cuestiones para avanzar en el aspecto de la **comunicación emergente** en colectivos de robots

Duarte and Ramos de Arruda. Distributed strategy for communication between multiple robots during formation navigation task. Robotics and Autonomous Systems. 169. 2023.
Ibrahim, R. ... Tuci, E et al. Review of Collective Decision Making in Swarm Robotics. Journal of AI-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics, 16(1), Comp. 72–80. 2024.
Salman, M., Garzón Ramos, D. & Birattari, M. Automatic design of stigmergy-based behaviours for robot swarms. Commun Eng 3, 30. 2024
Oddi, F., Reina, A., Trianni, V. (2024). Minimalist Protocols for Quorum Sensing in Robot Swarms. In: Hamann, H., et al. Swarm Intelligence. ANTS 2024

- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 Transferencia y Emergencia
 - Comunicación transferible
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

Planteamiento

SEMÁNTICA EMERGENTE

Los **robots** deben **crear representaciones** de lo percibido con sus sensores y **crear un léxico** que sea **compartido** y **consensuado** entre los **individuos** para el enriquecimiento del colectivo

Planteamiento

COMUNICACIÓN TRANSFERIBLE

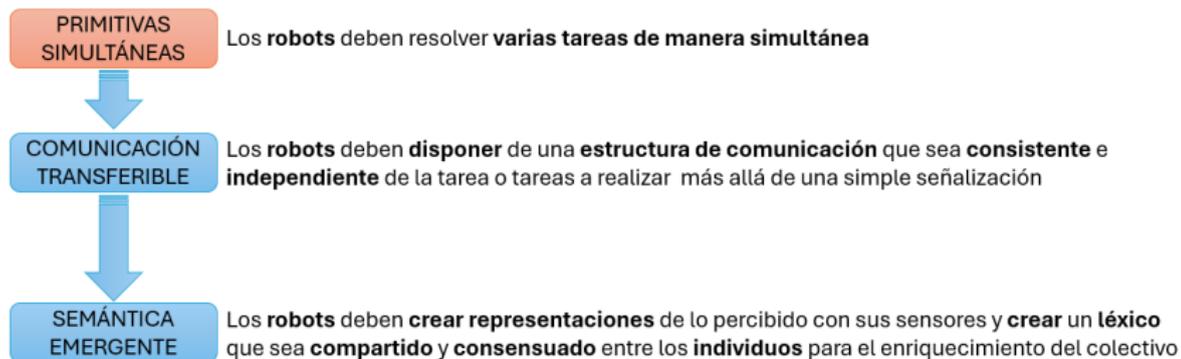
Los **robots** deben **disponer** de una **estructura de comunicación** que sea **consistente e independiente** de la tarea o tareas a realizar más allá de una simple señalización



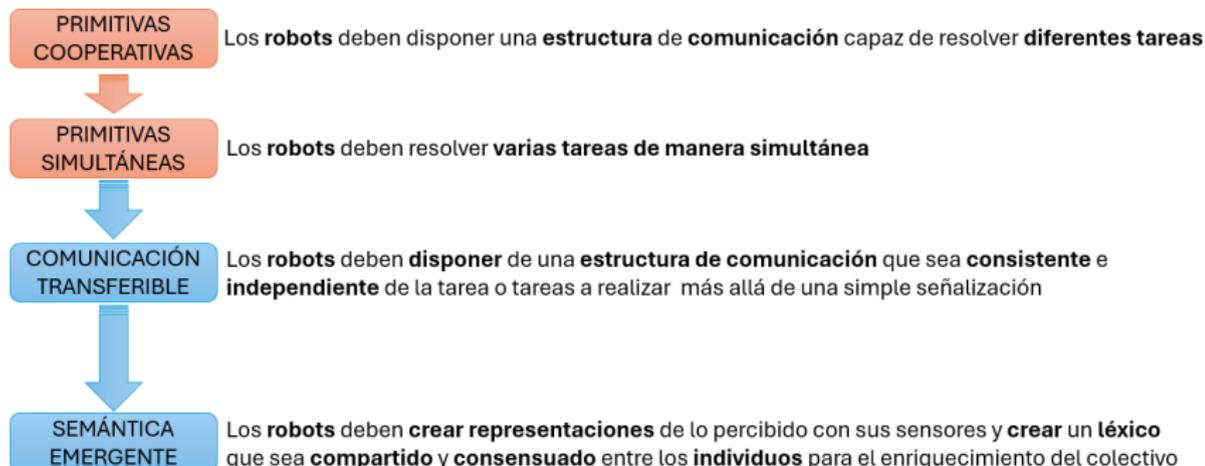
SEMÁNTICA EMERGENTE

Los **robots** deben **crear representaciones** de lo percibido con sus sensores y **crear un léxico** que sea **compartido y consensuado** entre los **individuos** para el enriquecimiento del colectivo

Planteamiento



Planteamiento

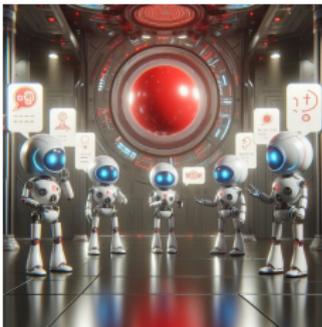


- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 Transferencia y Emergencia
 - Comunicación transferible
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

Primitivas cooperativas

Motivación

- ¿Es posible resolver tareas colaborativas que requieran iteración con comunicación simple y limitada?
- ¿Puede la robótica evolutiva hacer uso de dicha comunicación?
- ¿Se puede usar el mismo controlador en diferentes tareas?



Rafael Sendra and Álvaro Gutiérrez. Evolution of Situated and Abstract Communication in Leader Selection and Borderline Identification Swarm Robotics Problems. *Applied Sciences*, 11(8), April 2021

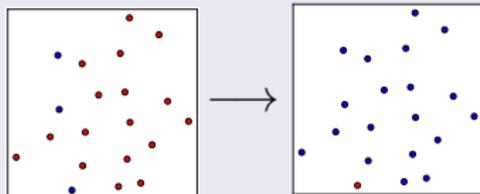
R. Sendra-Arranz and A. Gutiérrez(2023). Emergence of Communication Through Artificial Evolution in an Orientation Consensus Task in Swarm Robotics. In: Maglogiannis, I., Iliadis, L., MacIntyre, J., Dominguez, M. (eds) *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2023*. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 676. 2023

R. Sendra-Arranz and A. Gutiérrez. Emergence of flocking behaviors transferring previously evolved alignment robot controllers. *Evolving Systems*. Under Review

Experimentos

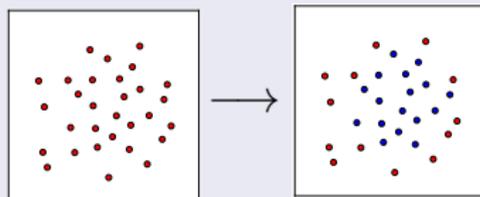
Exp. A: Selección del Líder

- Solo un individuo reivindica el liderazgo



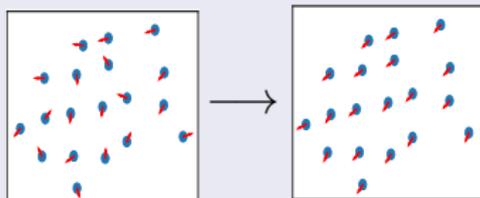
Exp.B: Identificación del borde

- Identificar los robots que forman la frontera o perímetro



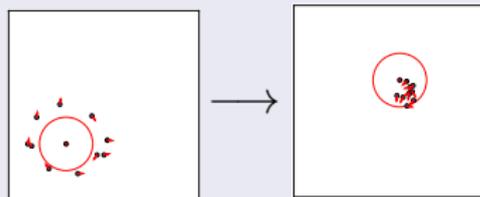
Exp C: Consenso de Orientación

- Todos los robots deben orientarse en la misma dirección



Exp D: Seguidor de luz

- Todos los individuos deben seguir una luz tan cerca como sea posible



Primitivas cooperativas

- Se propone un **sistema colectivo reducido**, con un sistema de comunicación sencillo.
 - Rango limitado de comunicación
 - Solo un mensaje por time step
 - 4 posibles orientaciones
- Utilizamos algoritmos genéticos **GA** en *continuous-time recurrent neural networks* (**CTRNNs**).
- Se analiza la comunicación que emerge con motivo de la evolución
- El sistema prueba mantener principios de **escalabilidad y robustez**.

Sistema de Comunicación

Esquema de comunicación

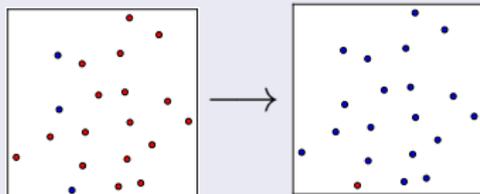
$$\phi_{RX}(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{RX}(k) \\ \phi_{DS}(k) \\ \cos(\theta_{RX}(k)) \\ \sin(\theta_{RX}(k)) \\ \cos(\theta_{TX}(k)) \\ \sin(\theta_{TX}(k)) \\ MODE \end{pmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow \text{Message} \\ \rightarrow \text{Normalized signal strength} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{Reception Orientation} \\ \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{Transmission Orientation} \\ \rightarrow \text{Communication state} \end{array}$$

- Estado de comunicación (*MODE*):
 - { **SEND**: El Robot envía su propio mensaje
 - { **RELAY**: El Robot retransmite un mensaje recibido
- ¿Cómo se selecciona el estado? Aleatoriamente:
 - El número de saltos es menor que un umbral `max_hops`
 - El que ha enviado el mensaje no puede ser receptor o retransmisor del mismo

Experimentos

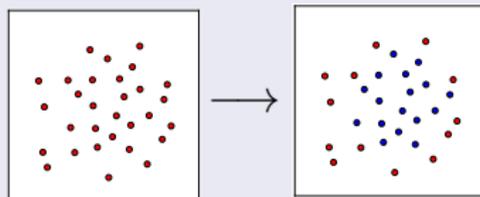
Exp. A: Selección del Líder

- Solo un individuo reivindica el liderazgo



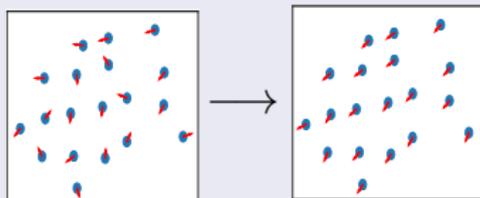
Exp.B: Identificación del borde

- Identificar los robots que forman la frontera o perímetro



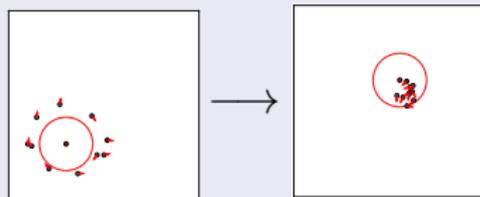
Exp C: Consenso de Orientación

- Todos los robots deben orientarse en la misma dirección



Exp D: Seguidor de luz

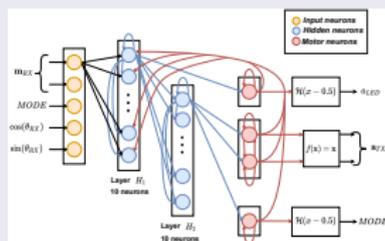
- Todos los individuos deben seguir una luz tan cerca como sea posible



Controladores

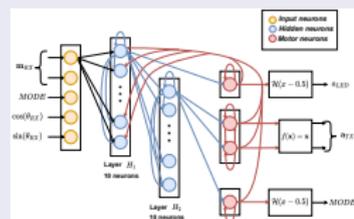
Exp. A: Selección del Líder

- Solo un individuo reivindica el liderazgo



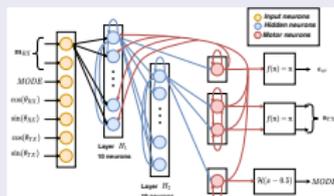
Exp.B: Identificación del borde

- Identificar los robots que forman la frontera o perímetro



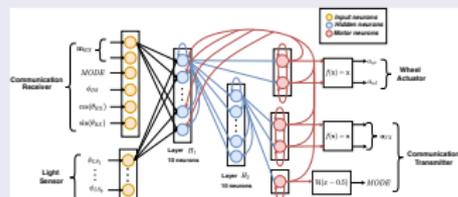
Exp C: Consenso de Orientación

- Todos los robots deben orientarse en la misma dirección



Exp D: Seguidor de luz

- Todos los individuos deben seguir una luz tan cerca como sea posible



Fitness

Exp. A: Selección del Líder

- Solo un individuo reivindica el liderazgo
 - Identificación de líder
 - Cuantos menos mejor
 - Perseverancia
 - Cuantos más tiempo mejor

Exp.B: Identificación del borde

- Identificar los robots que forman la frontera o perímetro
 - Concordancia en el borde
 - Si se identifica como borde
 - Si no se identifica como borde

Exp C: Consenso de Orientación

- Todos los robots deben orientarse en la misma dirección
 - Desviación en la orientación
 - Reducción de velocidad

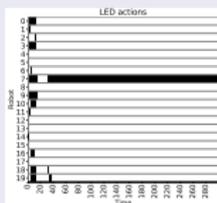
Exp D: Seguidor de luz

- Todos los individuos deben seguir una luz tan cerca como sea posible
 - Cercanía a la luz
 - Cuanto más cerca mejor

Comunicación

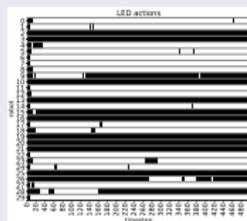
Exp. A: Selección del Líder

- Solo señalización



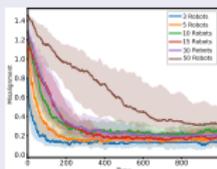
Exp.B: Identificación del borde

- Comunicación situada



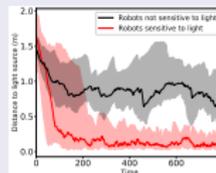
Exp C: Consenso de Orientación

- Comunicación abstracta y situada



Exp D: Seguidor de luz

- Comunicación situada



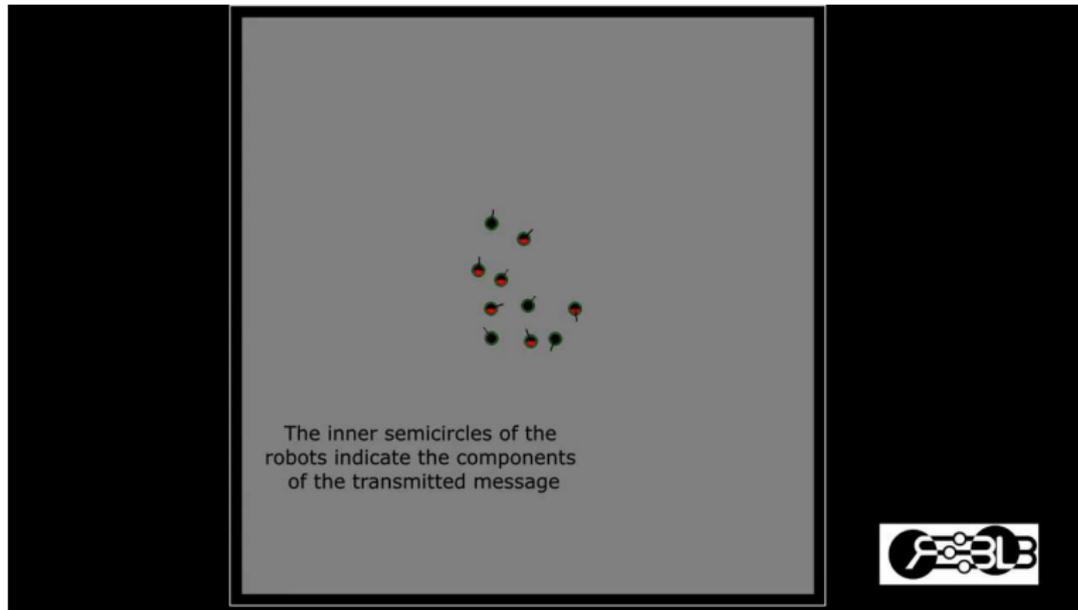
Resultados: Exp. A (Selección del líder)

20 Robots

Resultados: Comportamiento y Comunicación Exp. B (Identification del borde)

30 Robots

Resultados: Exp. C (Consenso de orientación)



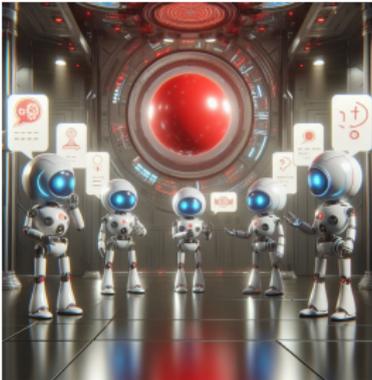
10 Robots

Only 2 robots can sense the light.
The rest of the swarm can know the
light's position through communication.

Conclusiones

Conclusiones

- Hemos homogeneizado un controlador pero con diferentes técnicas de comunicación
- ¿Sería posible extender el trabajo para resolver varias tareas simultáneamente?



- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 Transferencia y Emergencia
 - Comunicación transferible
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

Varias tareas simultáneas

Motivación

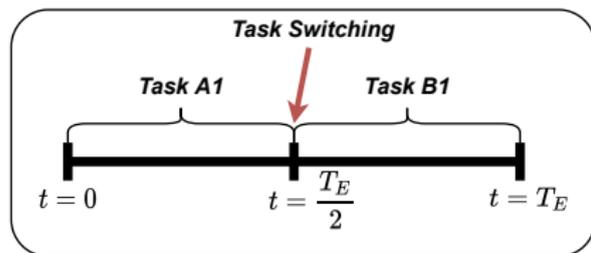
- ¿Es posible evolucionar controladores que permitan realizar varias tareas simultáneamente?
- ¿Qué ocurre cuando el conocimiento de los robots sobre la tarea a realizar no es homogéneo?
- ¿Es posible que la evolución permita la creación de una comunicación para resolver el problema?



Experimento 1: Descripción

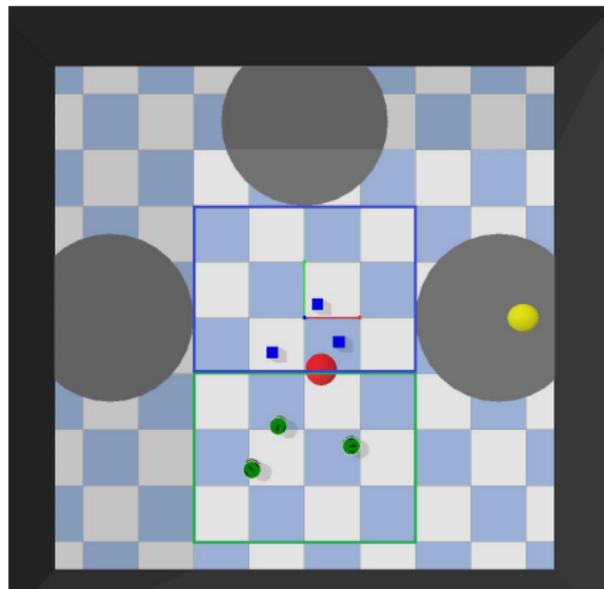
Experimento 1

Estudia problemas de **cambios de tareas y multitarea** en robótica colectiva mediante **CTRNNs**, NeuroEvolution of Augmenting Topologies **NEAT** y aprendizaje Hebbiano



Las dos tareas a resolver son:

- **Task A1:** perseguir una luz roja por el entorno
- **Task B1:** transportar cubos a una zona común



Experimento 2: Descripción

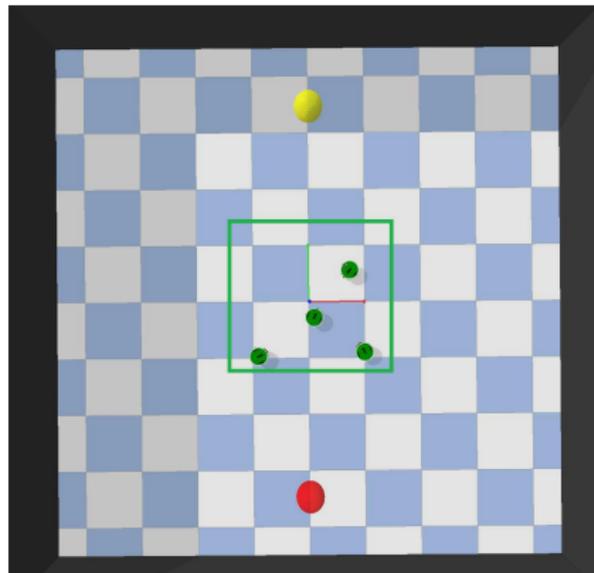
Experimento 2

Estudia la **emergencia de comunicación** en robótica colectiva mediante **CTRNNs**, **NEAT** y aprendizaje Hebbiano

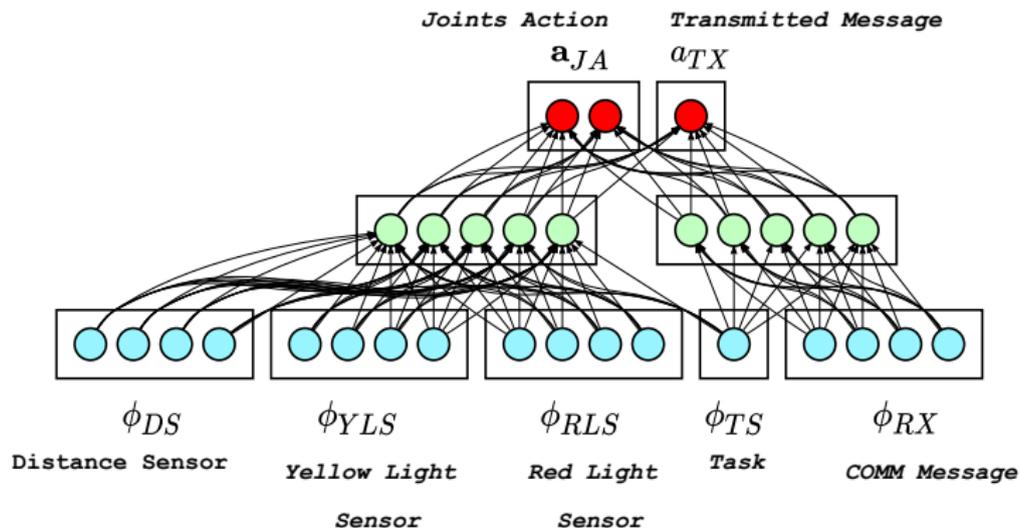
Las dos tareas a resolver son:

- **Task A2:** perseguir una luz roja en movimiento
- **Task B2:** perseguir una luz amarilla en movimiento

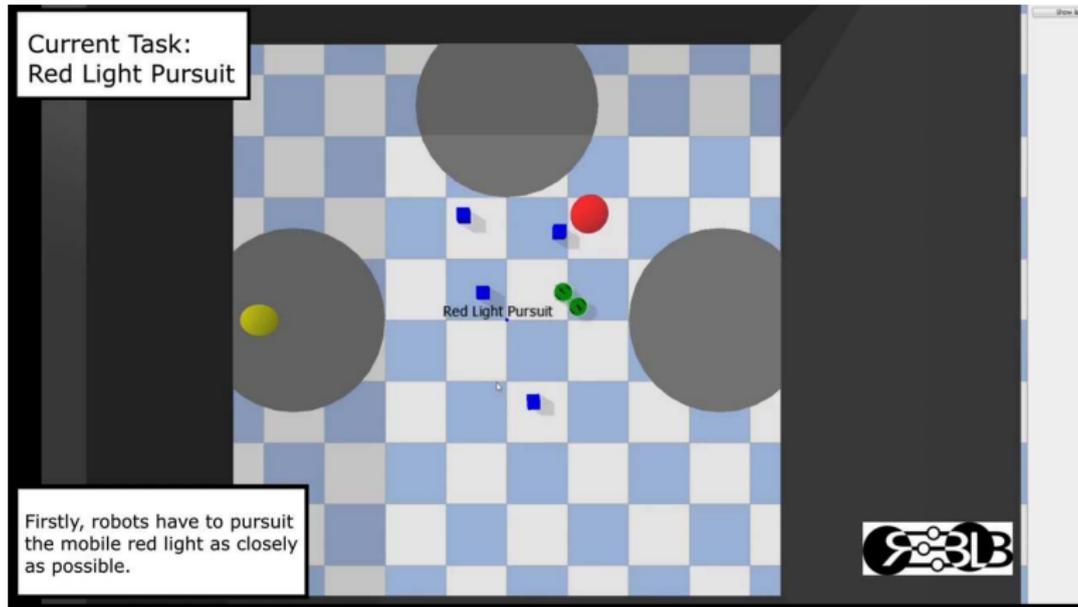
Solo un robot tiene constancia de cuál es la tarea correcta a resolver



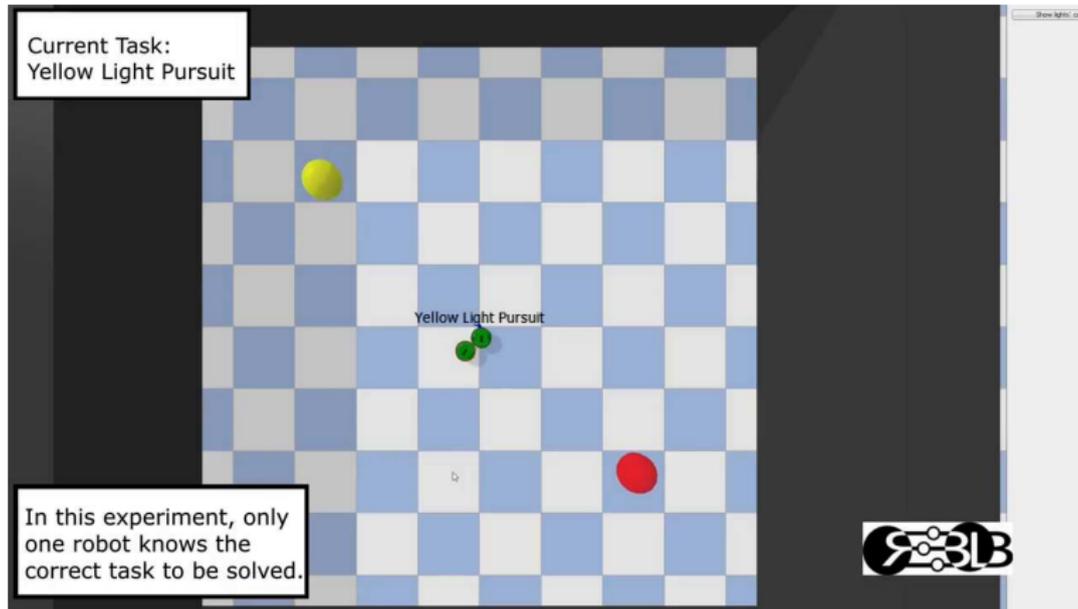
Experimento 2: Controlador



Resultados: Exp. 1



Resultados: Exp. 2



Conclusiones

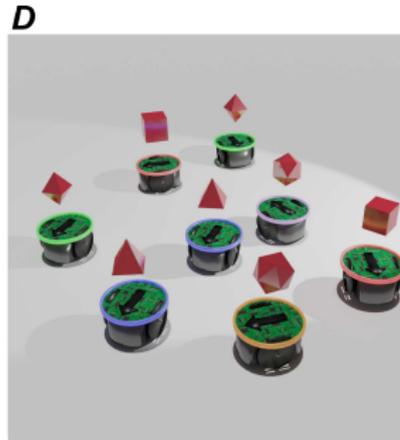
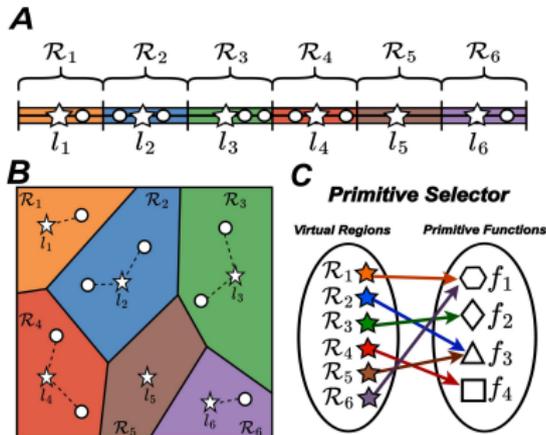
- Hemos homogeneizado un controlador para diferentes tareas
- ¿Sería posible extender el trabajo para que la comunicación pueda ser también homogénea?



- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 **Transferencia y Emergencia**
 - **Comunicación transferible**
 - Semántica emergente
- 4 Conclusiones

Comunicación transferible

- Espacio de comunicación virtual \mathcal{S}
- \mathcal{S} está dividido en regiones virtuales
 $\mathcal{R} = \{\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_M\}$, $|\mathcal{S} = \mathcal{R}_1 \cup \mathcal{R}_2 \cup \dots \cup \mathcal{R}_M$
- Cada robot (i) mantiene un estado en el espacio de comunicación $\mathbf{s}_i \in \mathcal{S}$
- Definimos primitivas ($f(\cdot)$) en el espacio del robot asociado a la regiones virtuales $f_{\mathcal{R}}(\mathbf{s}_i) = \mathcal{R}_k \iff \mathbf{s}_i \in \mathcal{R}_k$



Comunicación transferible

- Los robots navegan virtualmente en el espacio de comunicación

$$a_i, \theta_{tar,i} = f_{comm}(s_i, s_{cst}, l_{cst}, l_{tar})$$

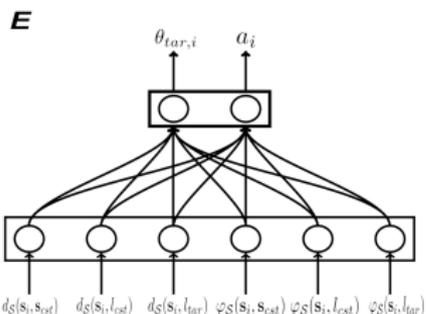
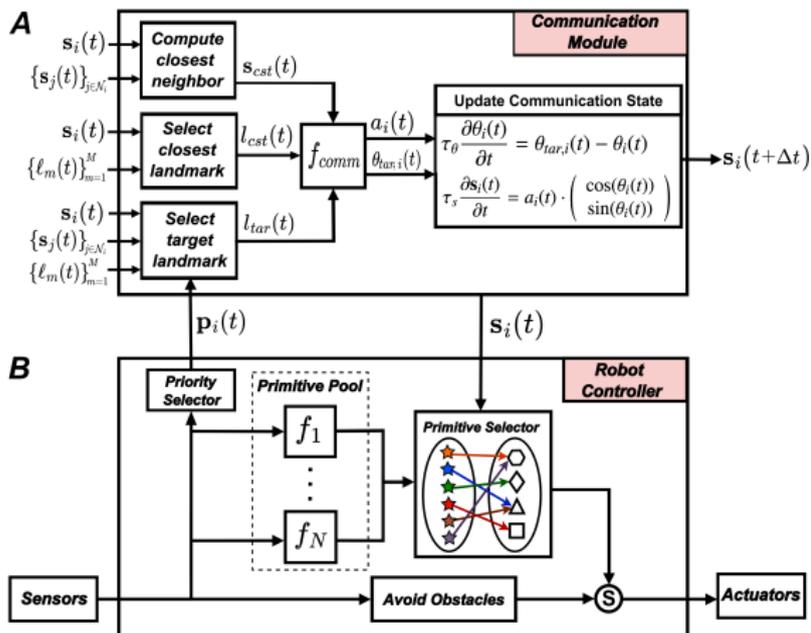
$a_i \in [0, 1]$: velocidad

$\theta_{tar,i} \in [0, 2\pi)$: orientación

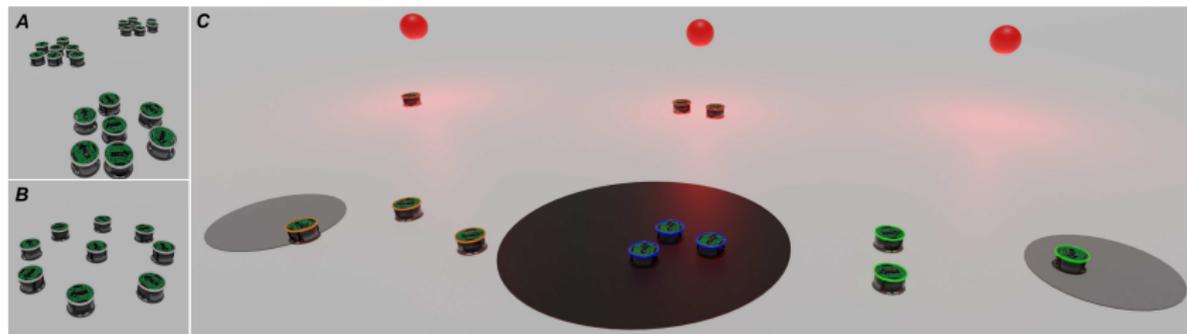
s_{cst} : vecino más cercano

l_{cst} : marca más cercana

l_{tar} : marca objetivo

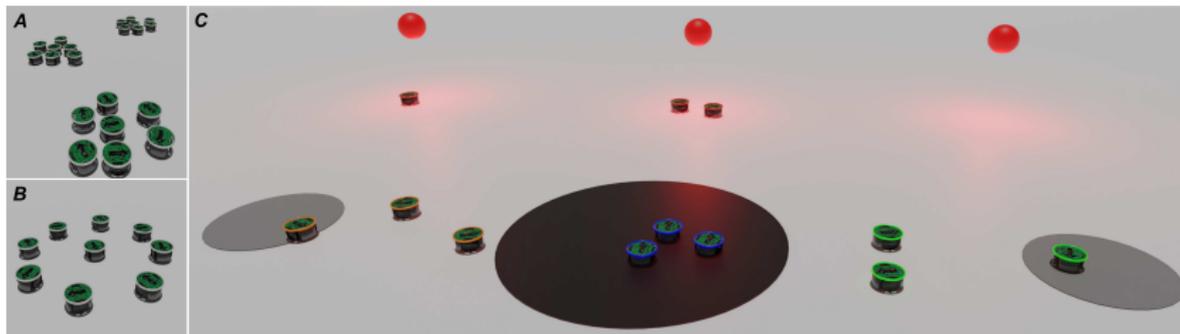


Experimentos - Agregación

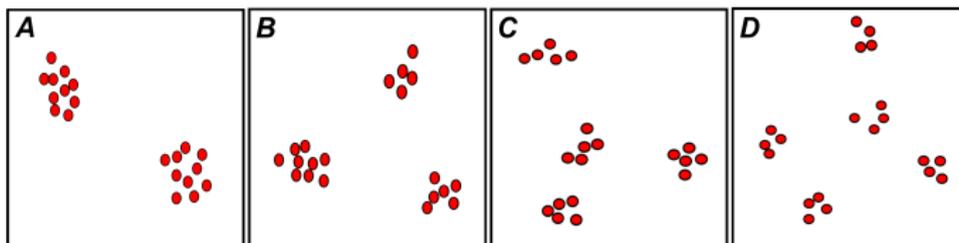


- **Agregación:** $f_i \longrightarrow$ “Go to the center of mass coordinates of the neighbors also belonging to group i ”
- G grupos de robots
- Ejemplo: 3 grupos de 7 robots cada uno
 - $\{\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_7\} \longrightarrow f_1$
 - $\{\mathcal{R}_8, \dots, \mathcal{R}_{14}\} \longrightarrow f_2$
 - $\{\mathcal{R}_{15}, \dots, \mathcal{R}_{21}\} \longrightarrow f_3$

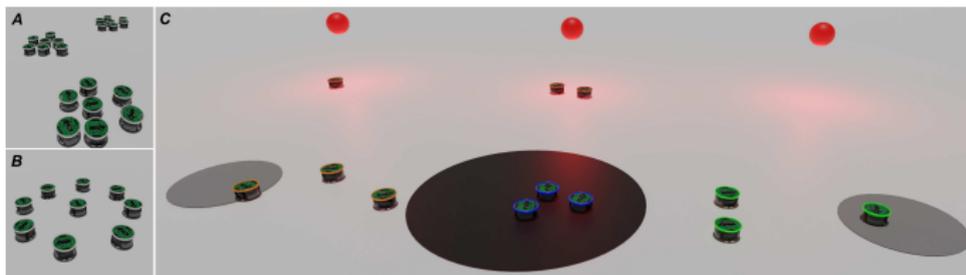
Experimentos - Agregación



- **Agregación:** $f_i \rightarrow$ "Go to the center of mass coordinates of the neighbors also belonging to group i "

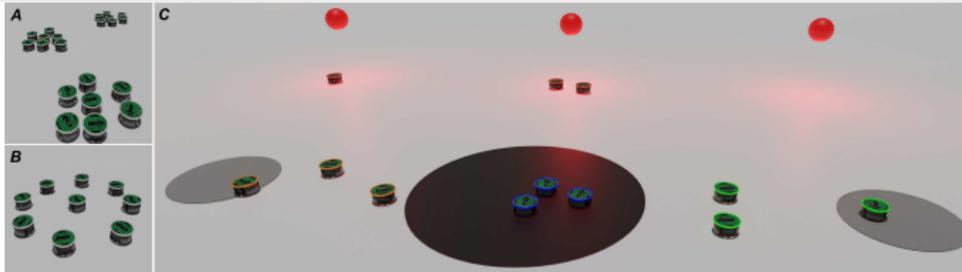


Experimentos - Formación

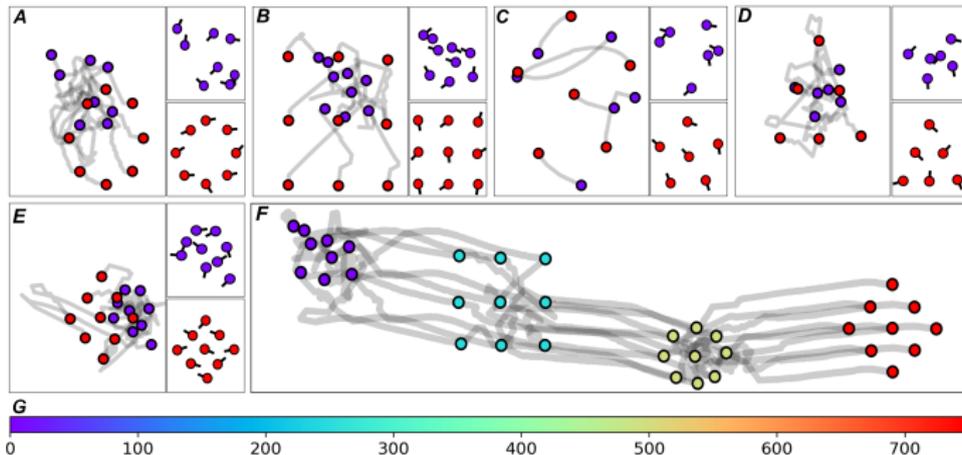


- **Formación:** $f_i \rightarrow$ “Go to coordinates $\mathbf{x}_i^*(t) = \mathbf{c}(t) + \Delta_i$ ”
- $\{\mathbf{x}_1^*(t), \dots, \mathbf{x}_N^*(t)\} = \{\mathbf{c}(t) + \Delta_1, \dots, \mathbf{c}(t) + \Delta_N\}$,
- $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^2$ centro de masas del enjambre
- $\Delta_i \in \mathbb{R}_+^2$ vector offset que define \mathbf{x}_i^* relativo a \mathbf{c}

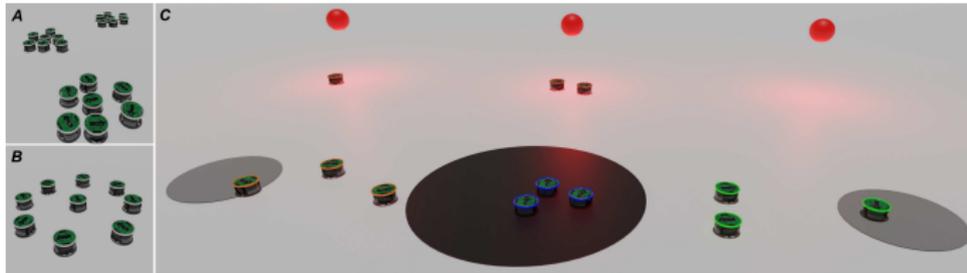
Experimentos - Formación



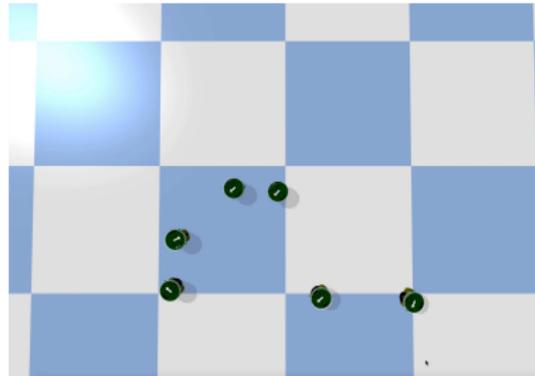
- **Formación:** $f_i \rightarrow$ “Go to coordinates $\mathbf{x}_i^*(t) = \mathbf{c}(t) + \Delta_i$ ”



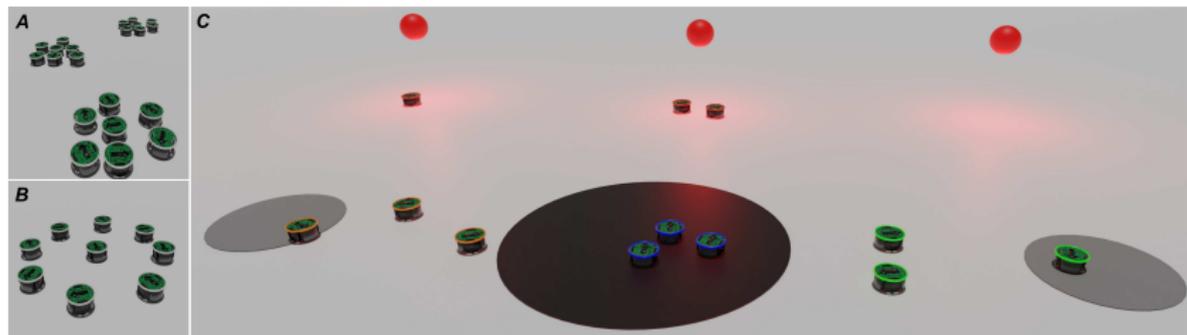
Experimentos - Formación



- **Formación:** $f_i \rightarrow$ “Go to coordinates $\mathbf{x}_i^*(t) = \mathbf{c}(t) + \Delta_i$ ”



Experimentos - Recolección

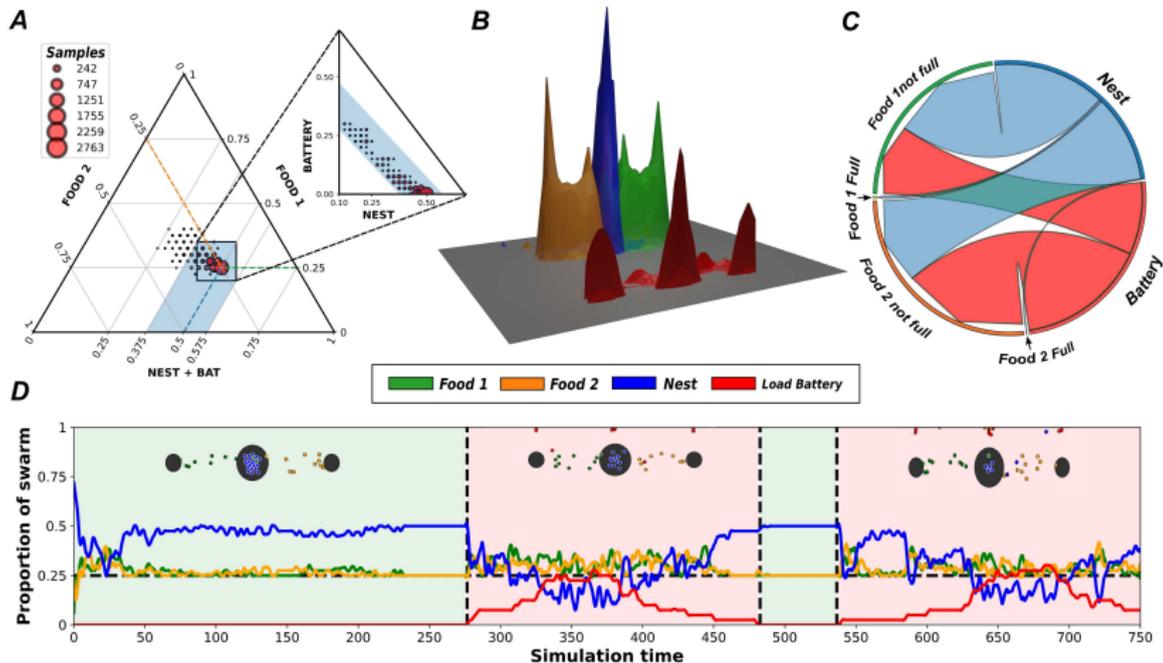


● **Recolección:**

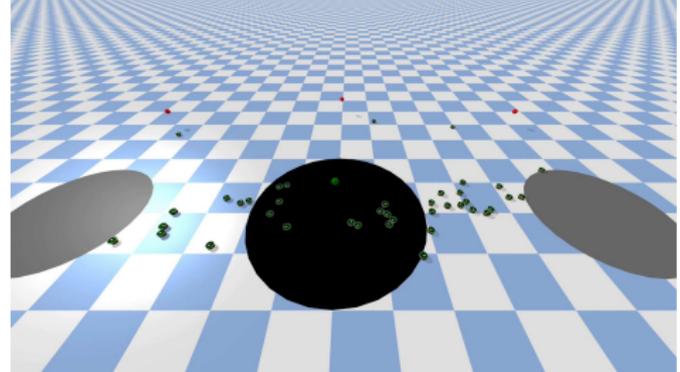
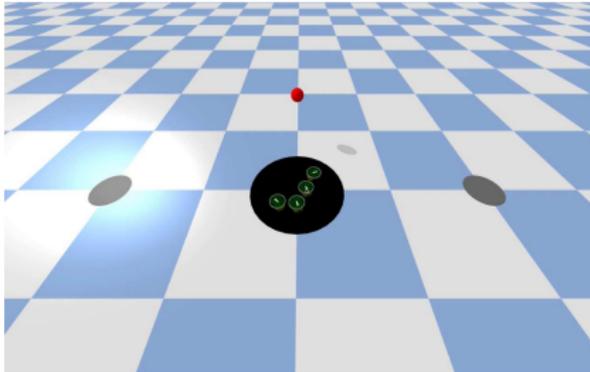
- $f_1 \rightarrow$ "Stay in the nest area",
- $f_2 \rightarrow$ "Forage from food area 1",
- $f_3 \rightarrow$ "Forage from food area 2",
- $f_4 \rightarrow$ "Recharge battery (phototaxis)"

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{nest} &= \{\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_{\frac{N}{2}}\} && \rightarrow f_1 \\ \mathcal{R}_{food1} &= \{\mathcal{R}_{\frac{N}{2}+1}, \dots, \mathcal{R}_{\frac{3N}{4}}\} && \rightarrow f_2 \\ \mathcal{R}_{food2} &= \{\mathcal{R}_{\frac{3N}{4}+1}, \dots, \mathcal{R}_N\} && \rightarrow f_3 \\ \mathcal{R}_{bat} &= \mathcal{R}_{N+1} && \rightarrow f_4\end{aligned}$$

Experimentos - Recolección



Experimentos - Recolección



Módulos de comunicación transferible

Resultado

- Se ha **diseñado** una estructura de comunicación estandarizada
- Se ha evolucionado una vez y **transferido** a los robots
- Se ha utilizado para resolver **diferentes tareas**
- Sin embargo, el significado de la comunicación se proporciona en fase de diseño
- **¿Es posible que los robots desarrollen un léxico consensuado?**



- 1 Contexto y Planteamiento
 - Contexto
 - Planteamiento
- 2 Resultados preeliminares
 - Primitivas cooperativas
 - Primitivas simultáneas
- 3 **Transferencia y Emergencia**
 - Comunicación transferible
 - **Semántica emergente**
- 4 Conclusiones

Semántica emergente

Motivación

- ¿Es posible que un robot **crea un léxico** anclado a sus sensores?
- ¿Es posible que un conjunto de robots pueda **compartir** el léxico?
- ¿Es posible que ese léxico sea **adoptado** y **minimizado** por consenso?



Semántica emergente

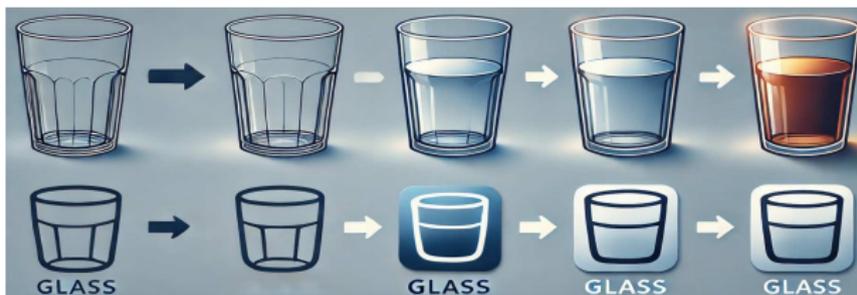
- En robótica, la comunicación basada en señalización surge en su mayoría para tareas **ad-hoc** y no suelen poder generalizarse
- **Juegos de lenguaje** y **evolución cultural** se han propuesto recientemente como un nuevo paradigma la emergencia de la comunicación
- Casi todos los trabajos se limitan a unas **pocas palabras** en el léxico y a **tareas específicas**.



- E. Tuci, C. Ampatzis, Evolution of Acoustic Communication between Two Cooperating Robots, in Advances in Artificial Life (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg)(2007), pp. 395–404
- F. Ducatelle, G. A. Di Caro, C. Pinciroli, L. M. Gambardella, Self-Organized Cooperation between Robotic Swarms. Swarm Intelligence 5 (2), 73 (2011)
- N. Cambier, et al., Language Evolution in Swarm Robotics: A Perspective. Frontiers in Robotics and AI 7 (2020)
- R. Sendra-Arranz, Á. Gutiérrez, Evolution of Situated and Abstract Communication in Leader Selection and Borderline Identification Swarm Robotics Problems. Applied Sciences 11 (8), 3516 (2021)
- R. Miletitch, A. Reina, M. Dorigo, V. Trianni, Emergent naming conventions in a foraging robot swarm. Swarm Intelligence 16 (3), 211–232 (2022)

Problema del Anclaje del Símbolo

- La creación del léxico debe abordar el Problema del Anclaje del Símbolo
- Los **símbolos** (palabras en un léxico), en lugar de ser representaciones puramente abstractas, deben **fundamentarse en experiencias y objetos en el mundo real**
- ¿Cómo adquieren los símbolos su significado anclados a referentes externos y físicos en el mundo?
- Se distinguen generalmente 3 procesos:
 - **Iconización**: Transformación de señales sensoriales en representaciones
 - **Discriminación**: Determinar si dos señales son iguales o diferentes
 - **Identificación**: asignación de un símbolo o significado a una representación

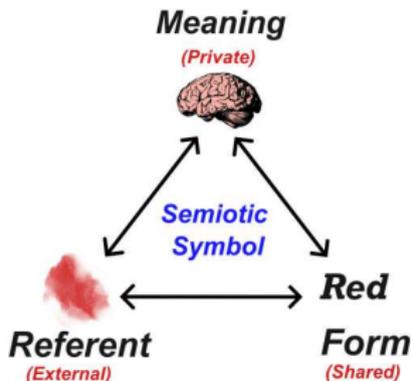


S. Harnad, The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 42 (1–3), 335–346 (1990)

L. Steels, Perceptually grounded meaning creation, in *Proceedings of the International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-96)* (1996), pp. 338–344

Problema del Anclaje del Símbolo Físico y Social

- Consideramos individuos corporeizados y situados
- Los individuos “anclan” sus símbolos en base a experiencias
- **Triángulo semiótico:**
 - **Referente:** El objeto externo
 - **Significado:** La representación simbólica
 - **Forma:** El símbolo usado en el lenguaje

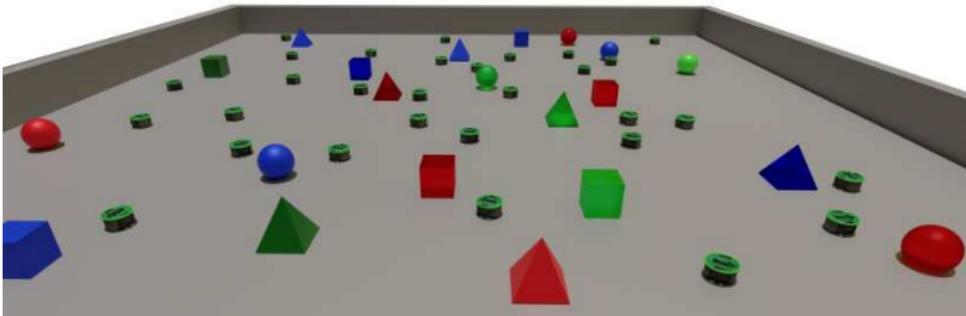


-
- P. Vogt, The physical symbol grounding problem. *Cognitive Systems Research* 3 (3), 429–457 (2002)
- L. Steels, F. Kaplan, Situated grounded word semantics, in *Proceedings of IJCAI 99*. Morgan Kaufmann. (1999)
- A. Cangelosi, The grounding and sharing of symbols. *Pragmatics & Cognition* 14 (2), 275–285 (2006)
- S. Kirby, J. R. Hurford, The Emergence of Linguistic Structure: An Overview of the Iterated Learning Model, in *Simulating the Evolution of Language* (Springer London, London), pp. 121–147 (2002)
- N. Chomsky, et al., *Reflections on language* (Temple Smith London) (1976)

Propuesta

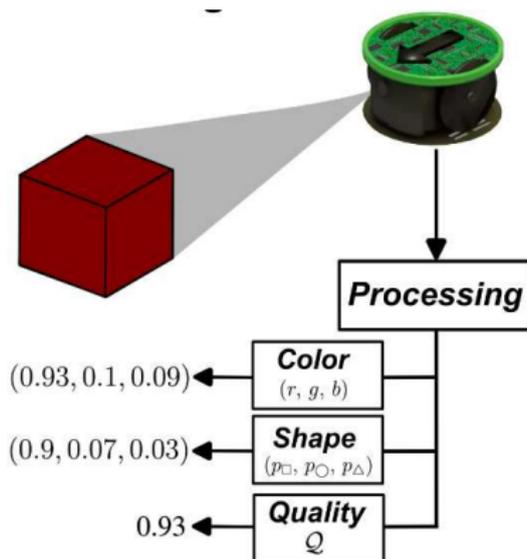
Trasladar los conceptos de **Problema del Anclaje del Símbolo** (Físico y Social) y **juegos del lenguaje** al campo de la **robótica de enjambre**

- Un conjunto de robots (hasta 100 individuos)
- Los robots comparten el entorno con un conjunto de formas geométricas
- Los robots exploran el entorno descubriendo nuevos **referentes**
- Los robots desarrollan y “anclan” **significados** en dichos referentes.
- Los robots comunican las **formas** (palabras) a los compañeros
- Emergencia de **composicionalidad**



Sensado del entorno

- Objetos (**Referentes**): $\mathcal{O} = \{o_1, \dots, o_N\}$
- Perciben del entorno mediante un conjunto de sensores
- Vector de características $\mathbf{x} = (r, g, b, p_{\square}, p_{\circ}, p_{\Delta}, Q)$



Iconización y discriminación

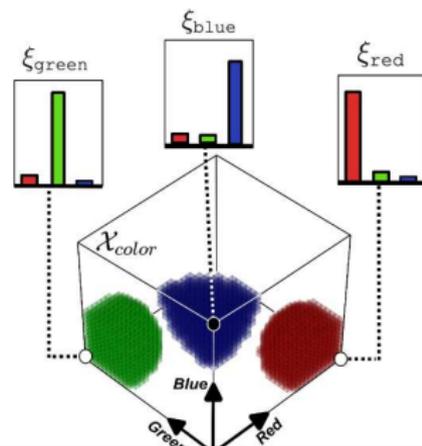
- Espacio sensorial \mathcal{X} y sus espacios parciales \mathcal{X}_s (e.g. \mathcal{X}_{color})
 donde $\mathcal{X} = \bigcup_{\forall_s} \mathcal{X}_s$
- **Estímulo** $\mathbf{x}_s \in \mathcal{X}_s$ una característica del sentido
- ξ_k , $k \in \{1, \dots, K\}$ corresponde a los **prototipos** resultantes de un proceso de “iconización”
- Cada estímulo \mathbf{x}_s se compara con los prototipos existentes

$$\xi_s^{\min} = \operatorname{argmin}_{\xi_k \in \mathcal{X}_s} \{ \|\mathbf{x}_s - \xi_k\|_2 \}$$

- Se calcula la distancia al estímulo

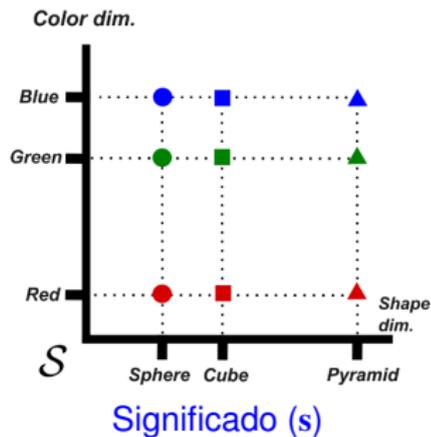
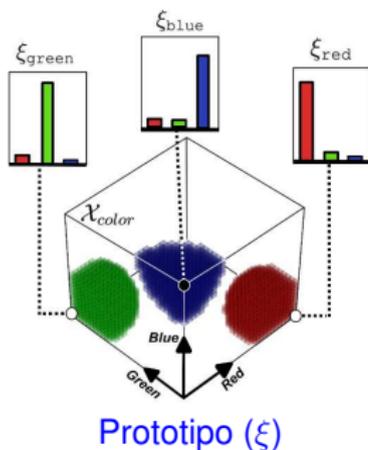
$$d_s^{\min} = \left\| \mathbf{x}_s - \xi_s^{\min} \right\|_2$$

$$\xi_s^{\text{new}} = \begin{cases} \xi_s^{\text{old}} + \lambda_{\xi} \cdot (\mathbf{x}_s(t) - \xi_s^{\text{old}}), & \text{if } d_s^{\min} \leq \theta_{\xi} \\ \mathbf{x}_s(t), & \text{if } d_s^{\min} > \theta_{\xi} \end{cases}$$



Símbolos Semióticos

- **Significados:** vector n -dimensional $s \in \mathcal{S}$
 - Dimensión fijada al número de capacidades sensoriales ($\dim(\mathcal{S}) = 3$)

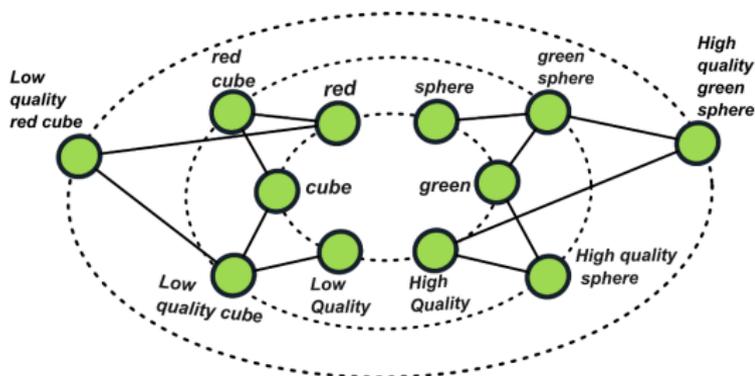
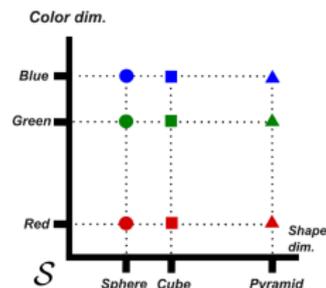


- Identificación: Transformamos prototipos en significados
 - Mapeo **privado** a cada individuo
- Palabras (**Formas**): $\mathcal{L} = \{\omega_1, \dots, \omega_L\}$

Composicionalidad

- Generamos un grafo $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{E}, \mathcal{S})$
- $a, b, c \in \mathcal{N}$ son nodos en \mathcal{G}
- s_a, s_b and s_c sus significados asociados
- $s_a = s_b + s_c \iff (b, a), (c, a) \in \mathcal{E}$
- e.g. s_{red} and $s_{\square} \iff s_{\text{red}+\square}$

$$\beta_i(t + \partial t) = \begin{cases} \beta_i(t) - \lambda_{\beta} \partial t \beta_i(t), \\ 1, \end{cases}$$

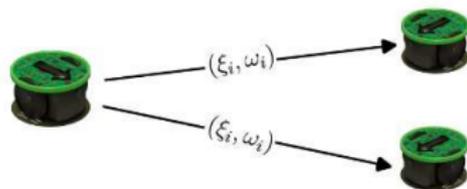


Composicionalidad - Juego del lenguaje

- En $t = 0 \rightarrow$ léxico = \emptyset
- Cada individuo construye su léxico según explora el entorno
- $\forall T$ cada robot comunica aleatoriamente una palabra (ω_i) de su léxico
 - Si ω_i es elemental $\rightarrow (\xi_i, \omega_i)$
 - Si ω_i es compuesta $\rightarrow (\omega_{p1}, \omega_{p2}, \omega_i)$, ω_{p1} y ω_{p2} antecedente de ω_i
- Si $\omega_i \notin \mathcal{L}$ (**nueva**) \rightarrow la añade a su léxico:
 - Si ω_i es elemental $\rightarrow \xi_i, s_i \in \mathcal{S}$ and \mathcal{G}
 - Si ω_i es compuesta $\rightarrow \omega_i$ se añade sii existen ω_{p1} y ω_{p2}
- Si $\omega_i \in \mathcal{L}$ (**conocida**) \rightarrow la actualiza en su léxico:
 - Si ω_i es elemental \rightarrow actualiza ξ_i al más cercano
 - Si ω_i es compuesta \rightarrow se actualiza el léxico y \mathcal{G} relativo de las 3 palabras.

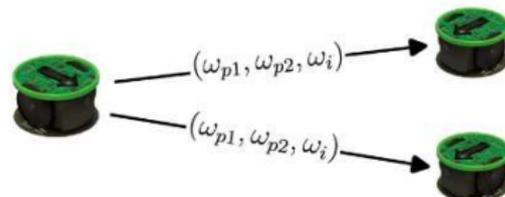
Transmission of elementary words

Speaker $\xleftrightarrow{<1m}$ Hearers



Transmission of composed words

Speaker $\xleftrightarrow{<1m}$ Hearers



Métricas de evaluación

- **Words in lexicons**

$$v = \left| \bigcup_{i=1}^R \mathcal{L}_i \right| = v_{elem} + v_{comp}$$

- **Lexicon Sharing Score (LSS)**

$$LSS = \frac{2}{R \cdot (R - 1)} \sum_{i=1}^R \sum_{i < j \leq R} \mathcal{J}(\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j)$$

$$\mathcal{J}(\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2) = \frac{|\mathcal{L}_1 \cap \mathcal{L}_2|}{|\mathcal{L}_1 \cup \mathcal{L}_2|} = \frac{v_{ij}}{L_1 + L_2 - v_{ij}}$$

- **Compositionality Sharing Score (CSS)**

$$CSS = \frac{2}{R \cdot (R - 1)} \sum_{i=1}^R \sum_{i < j \leq R} \mathcal{J}(\mathcal{A}_i, \mathcal{A}_j) = \frac{2}{R \cdot (R - 1)} \sum_{i=1}^R \sum_{i < j \leq R} \frac{a_{ij}}{A_i + A_j - a_{ij}}$$

$$A = (\omega_{p1}, \omega_{p2}, \omega) \in \mathcal{A} \text{ y } a_{ij} = |\mathcal{A}_i \cap \mathcal{A}_j|$$

R número de robots, $\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j$ los léxicos del individuo i -th y j -th y $\mathcal{J}(\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j)$ el índice de Jaccard

Resultados con 3 referentes



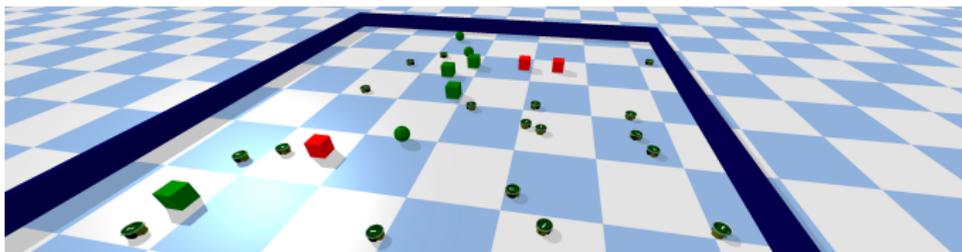
- 3 objetos (referentes)
 - Cubo rojo de baja calidad
 - Esfera azul de alta calidad
 - Cubo azul de alta calidad

Resultados con 3 referentes



- 3 objetos (referentes)
 - Cubo rojo de baja calidad
 - Esfera azul de alta calidad
 - Cubo azul de alta calidad
- 6 palabras elementales
 - 2 colores: azul y rojo
 - 2 formas: cubo y esfera
 - 2 calidades: alta y baja

- 11 palabras compuestas
 - Cubo rojo
 - Cubo azul
 - Esfera azul
 - Color azul de alta calidad
 - Color rojo de baja calidad
 - Cubo de alta calidad
 - Cubo de baja calidad
 - Esfera de alta calidad
 - Cubo rojo de baja calidad
 - Cubo azul de alta calidad
 - Esfera azul de alta calidad



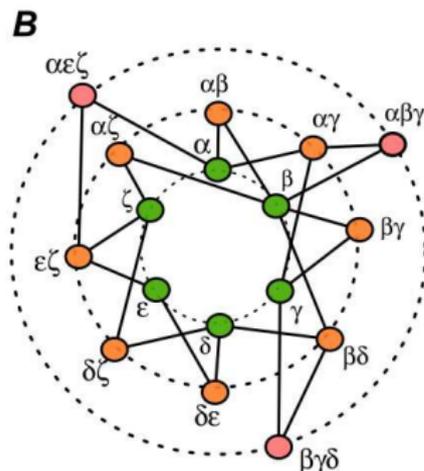
Resultados con 3 referentes



- 3 objetos (referentes), 6 significados elementales y 11 compuestos
- 6 prototipos \rightarrow 6 símbolos semióticos elementales (α - ζ)

A

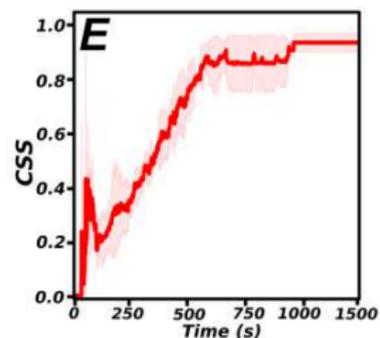
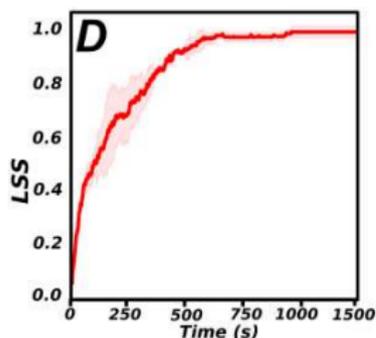
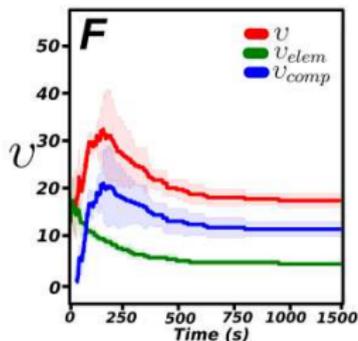
	r	g	b	p_{\square}	p_{\circ}	p_{Δ}	Q
α	0.0	0.0	0.0	0.96	0.03	0.01	0.0
β	0.02	0.02	0.78	0.0	0.0	0.0	0.0
γ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.98
δ	0.0	0.0	0.0	0.07	0.92	0.01	0.0
ϵ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
ζ	0.81	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0



Resultados con 3 referentes



- 3 objetos (referentes), 6 palabras elementales y 11 palabras compuestas
- 6 prototipos \rightarrow 6 símbolos semióticos (**significados**) elementales ($\alpha - \zeta$)



Resultados con 5 referentes



- 5 objetos (referentes)

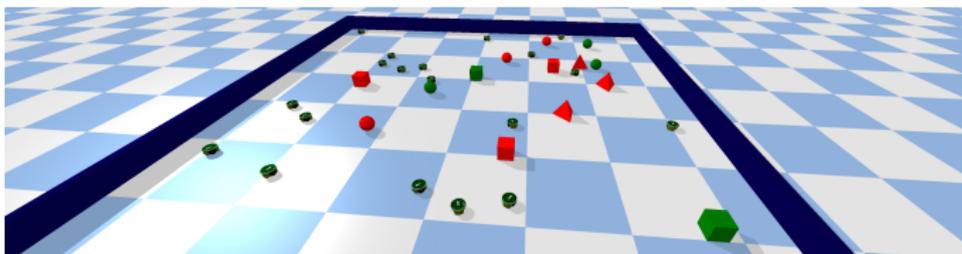
- Cubo rojo de baja calidad
- Cubo verde de alta calidad
- Esfera verde de alta calidad
- Esfera roja de baja calidad
- Pirámide roja de baja calidad

- 7 palabras elementales

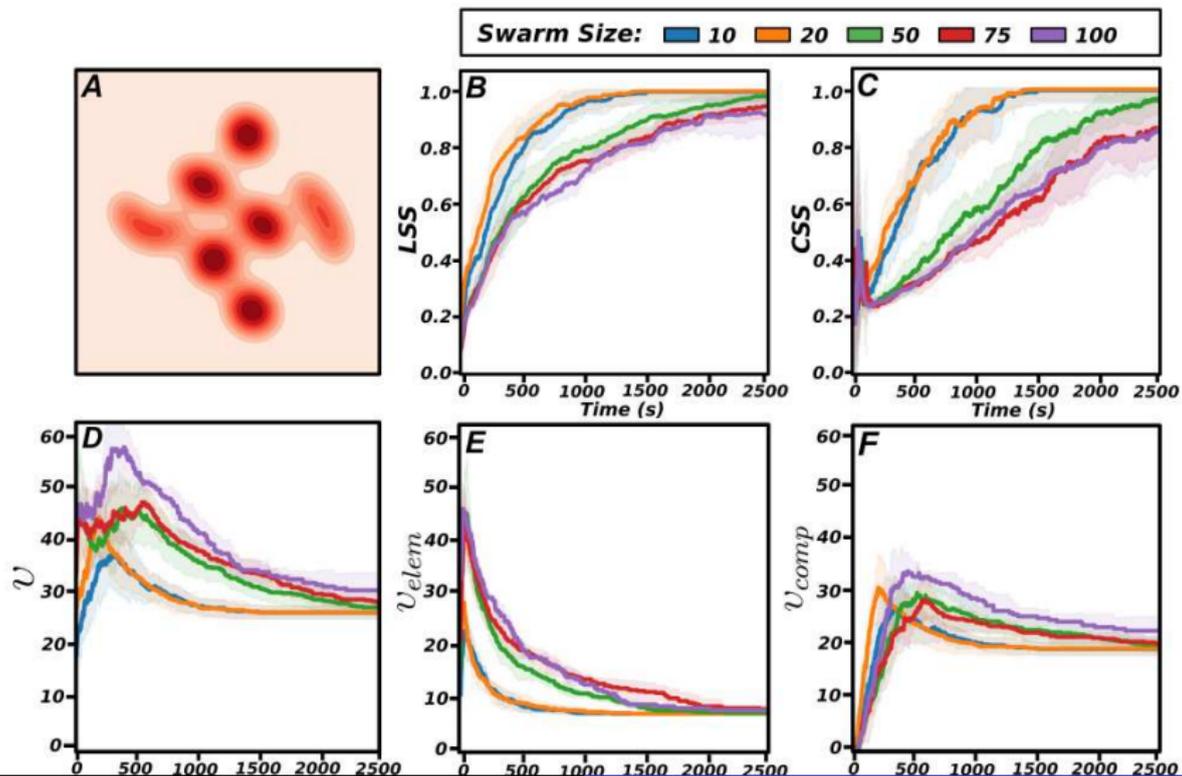
- 2 colores: rojo y verde
- 3 formas: cubo, esfera y pirámide
- 2 calidades: alta y baja

- 26 palabras compuestas

- 10, 20, 50, 75 y 100 robots



Resultados con 5 referentes

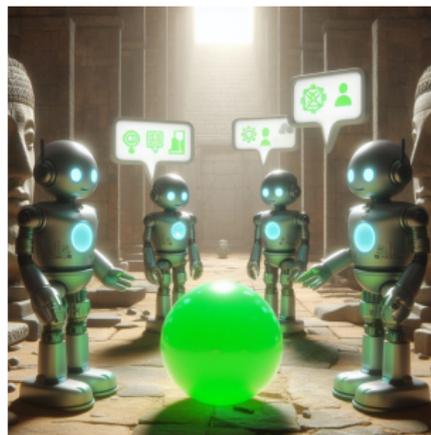


Conclusiones

Objetivo

Emergencia y Transferencia de Comunicación Semántica en Robótica Colectiva

- Arquitectura de comunicación transferible
- Comunicación independiente de la tarea
- Emergencia de un léxico
- Léxico anclado por los individuos
- Léxico anclado en el entorno
- Composicionalidad de palabras
- Transferencia del léxico entre individuos
- Léxico adoptado por el enjambre



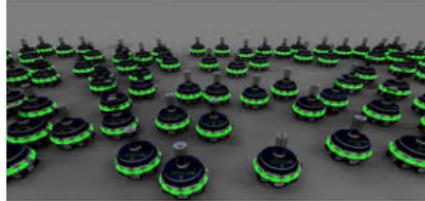
Gracias

GRACIAS

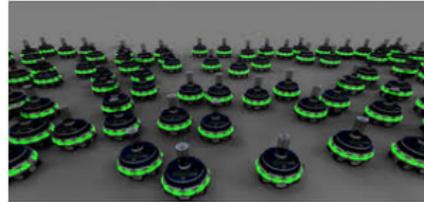
Gracias

GRACIAS

Aplicación de interés



Aplicación de interés



LLMs Dilema

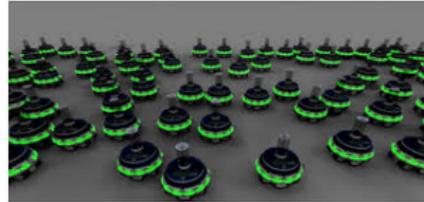
Potencial de las LLMs para producir contenido hiriente y no-ético

- Representa un problema de seguridad
- Se requieren varios “prompts”
- Correlación con duración y complejidad
- Progresión en la conversación afecta la seguridad
- **Anclarlo al mundo físico**



Roose, K. (2023). A Conversation With Bing's Chatbot Left Me Deeply Unsettled. The New York Times
Carlini, N. et al (2023). Are aligned neural networks adversarially aligned? arXiv:2306.15447
Glukhov, D. et al (2023). Llm censorship: A machine learning challenge or a computer security problem? arXiv:2307.10719
Phuong, M. et al (2024). Evaluating frontier models for dangerous capabilities. arXiv:2403.13793

Aplicación de interés



Comunicación Semántica en Robots de Asistencia

Comunicación emergente en robots de asistencia a la marcha

- Distanciamiento entre paciente y terapeuta
- Incorrecta implementación en las terapias
- Homogeneidad de implementación en distintos robots
- Modularidad en dispositivos hardware
- **Anclarlo al mundo físico**



Gabriel Delgado-Oleas et al. Bioinspired Hierarchical Electronic Architecture for Robotic Locomotion Assistance: Application in Exoskeletons IEEE Access , 11, pp. 131610-131622, November 2023

Gabriel Delgado-Oleasi et al. Diseño y desarrollo de una arquitectura electrónica bioinspirada para el control de sistemas de asistencia a la locomoción. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial , 20, June 2023