Marco difuso sensible al contexto para el reconocimiento interpretable de actividades humanas bajo incertidumbre*

Juan F. Gaitán-Guerrero[1,**], David Díaz-Jiménez[2], Carmen Martínez-Cruz[3], José L. López-Ruiz[1], Antonio P. Albín-Rodríguez[1], and Macarena Espinilla[1]

[1] Universidad de Jaén, Jaén, España
{jgaitan,llopez,aalbin,mestevez}@ujaen.es
[2] Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
david.djimenez@upm.es
[3] Universidad de Granada, Granada, España
cmcruz@ugr.es

Resumen Pese al creciente interés por la robustez y la explicabilidad, la mayoría de los sistemas actuales sigue tratando la incertidumbre como una molestia a minimizar en lugar de como una característica estructural a modelar. Este trabajo propone un cambio conceptual: situar la lógica difusa como paradigma central para diseñar sistemas de reconocimiendo de actividades humanas (HAR) interpretables, adaptativos y conscientes de la incertidumbre. El marco teórico integra el razonamiento difuso desde la abstracción de sensores y el modelado del contexto hasta la inferencia de actividades y las explicaciones en lenguaje natural, ilustrándose mediante un caso de uso de monitorización en cuidados de personas mayores. El enfoque propuesto permite establecer sistemas mejor alineados con la complejidad del comportamiento humano y las exigencias de una IA centrada en las personas.

Keywords: Reconocimiento de Actividades · Lógica Difusa · Modelado de la Incertidumbre · IA Explicable · Sistemas Sensibles al Contexto.

1. Introducción y motivación

El HAR se ha convertido en una capacidad fundamental de los sistemas inteligentes desplegados en hogares sensorizados, con aplicaciones en vida asistida por el entorno, asistencia sanitaria remota y automatización personalizada. Sin embargo, la transición de entornos controlados al uso cotidiano expone una limitación persistente y poco abordada: la incertidumbre [1]. Esta se manifiesta de múltiples formas:lecturas ruidosas o incompletas de sensores, variabilidad

* Resumen del trabajo publicado en *Proceedings of the 59th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-59)*, 2026, pp. 1960–1969. URI: https://hdl.handle.net/10125/111631.

** Corresponding author: jgaitan@ujaen.es

individual al ejecutar la misma actividad, transiciones difusas entre acciones, o comportamientos coexistentes que se escapan de una categorización nítida y constituye, más que una perturbación ocasional, una condición estructural del HAR en el mundo real.

Los enfoques dominantes manejan mal esta condición. Los modelos guiados por datos, especialmente el aprendizaje profundo, logran resultados notables en conjuntos de referencia, pero dependen de grandes volúmenes de datos etiquetados, generalizan mal y operan como cajas negras difíciles de interpretar [7]. En el extremo opuesto, los sistemas basados en conocimiento ofrecen transparencia, pero carecen de flexibilidad para integrar la diversidad conductual o entradas ruidosas. La lógica difusa proporciona un mecanismo bien establecido, aunque infrautilizado, para representar conceptos vagos o parciales mediante descriptores lingüísticos y grados de pertenencia. Sin embargo, en la literatura sobre HAR su uso se ha limitado a roles auxiliares, tales como ajuste de umbrales, o suavizado de la incertidumbre en lugar de adoptarse como mecanismo fundamental de razonamiento [5]. El trabajo propone situar la lógica difusa como principio estructurador central para sistemas HAR que operan bajo incertidumbre, como un marco modular para la integración sistemática del razonamiento difuso en todas sus etapas.

2. Caracterización de la incertidumbre en HAR

El comportamiento humano es variable, sensible al contexto y rara vez reducible a estados discretos y repetibles, surgiendo la necesidad de distinguir cinco fuentes de datos que interactúan entre sí: (i) *sensoriales*, debido a mediciones imprecisas, pérdida de señal, oclusiones o interferencias; (ii) *contextuales*, por la ambigüedad de las condiciones ambientales o espaciales; (iii) *conductuales*, por las diferencias en cómo los individuos realizan tareas similares; (iv) *temporales*, ya que las transiciones entre actividades rara vez son discretas; y (v) *semánticas*, que refleja la vaguedad de definiciones de actividades como *limpiar* o *descansar*.

De esta forma, una pequeña desviación en la rutina de un usuario combinada con un cambio contextual puede confundir incluso a un sistema bien entrenado. Así, sin razonar bajo incertidumbre, los sistemas HAR se vuelven frágiles y excesivamente dependientes de patrones no flexibles. La incertidumbre debe tratarse, por tanto, como una propiedad de primer orden que ha de modelarse, no como ruido a suprimir. Esta convicción motiva el uso de la lógica difusa como formalismo capaz de representar confianza graduada, categorías lingüísticas y razonamiento basado en reglas [2].

3. Arquitectura del marco propuesto y caso de uso

El marco se organiza en cuatro etapas modulares que contribuyen a la capacidad global del sistema para razonar bajo imprecisión, adaptarse a la variación y ofrecer resultados interpretables.

1) Abstracción y preprocesamiento de sensores. Las lecturas brutas de detectores de movimiento, contactos de puertas, monitores ambientales y dispositivos vestibles se traducen en variables lingüísticas difusas con funciones de pertenencia solapadas: el movimiento como *bajo*, *moderado* o *alto*; la temperatura como *fría*, *confortable* o *cálida*; la proximidad RSSI como *cerca* o *lejos*.

2) Representación del contexto. Las variables ambientales y temporales — ubicación, ventanas de tiempo, condiciones ambientales — se representan asimismo como conjuntos difusos (*principalmente en la cocina*, *cerca del atardecer*). La variabilidad individual se capta mediante *perfiles de usuario difusos* que actúan como modificadores temporales o conductuales.

3) Inferencia difusa de actividad. En el núcleo se sitúa un motor de inferencia que combina descriptores difusos mediante reglas como *SI el movimiento es moderado Y la sala es cocina Y la hora es próxima al mediodía ENTONCES la actividad es cocinar (confianza alta)*. Pueden dispararse varias reglas a la vez, generando hipótesis ponderadas que reflejan grados de confianza en lugar de decisiones binarias. Las hipótesis coexistentes están soportadas explícitamente: una confianza de 0.7 en *cocinar* y 0.4 en *limpiar* puede llevar al sistema a posponer la acción, solicitar confirmación o preparar ambas vías de respuesta. Las reglas pueden inspeccionarse, refinarse y ampliarse, conciliando explicabilidad y mantenimiento a largo plazo [4].

4) Explicación de la decisión y gestión de la salida. La naturaleza basada en reglas de inferencia permite explicaciones fundamentadas en la propia lógica interna del sistema, p. ej. *"Actividad clasificada como cocinar (confianza: 0.76), basada en movimiento moderado en la cocina durante la mañana tardía."* Cuando la confianza es baja o varias actividades son igualmente probables, el sistema puede posponer la automatización, lanzar un aviso o pedir aclaraciones, cerrando el ciclo entre sensado, razonamiento e interacción [6].

Un escenario representativo de vida asistida por el entorno ilustra el marco: una residente de avanzada edad que vive sola en un apartamento equipado con sensores ambientales y un dispositivo vestible. A las 7:45 h, un movimiento bajo en el dormitorio seguido de movimiento moderado en el pasillo y la apertura de una puerta hacia la cocina activa parcialmente la regla de preparación del desayuno (confianza 0.65) y la regla de despertarse (0.45). El módulo de decisión puede esperar más evidencia antes de notificar. La salida es interpretable: *"La residente probablemente está preparando el desayuno (0.65), por movimiento moderado en la cocina a primera hora de la mañana."* Si a las 10:00 h no se detecta actividad en la cocina y el movimiento en el dormitorio sigue siendo bajo, se genera una alerta suave que sugiere revisar el patrón, respetando la variabilidad personal y permitiendo a la vez la intervención temprana [3].

4. Consideraciones prácticas y trabajo futuro

La implementación implica la *creación* de la base de reglas mediante diseño participativo con expertos, cuidadores y usuarios finales, complementada con técnicas semiautomáticas; el *mantenimiento* mediante herramientas de visualización y edición interactiva que permiten actualizaciones incrementales sin reentrenamiento completo; y la *validación* más allá de la precisión, considerando robustez bajo incertidumbre, interpretabilidad y confianza del usuario.

La contribución central consiste en situar la incertidumbre como una propiedad estructural de primer orden y la lógica difusa como su formalismo natural en HAR. Frente a modelos que requieren reentrenamiento cuando cambian los entornos, una base de reglas difusas puede extenderse incrementalmente, algo especialmente valioso en despliegues reales donde las rutinas evolucionan y se incorporan nuevos sensores; al tratar la incertidumbre como un activo representacional e inferencial, el marco da soporte a sistemas HAR más adaptables, transparentes y sensibles al contexto, especialmente adecuados para cuidados de personas mayores, monitorización remota y tecnologías asistenciales. Como trabajo futuro, se plantea la validación longitudinal, el desarrollo de herramientas de diseño participativo, la integración neurodifusa preservando la interpretabilidad y la extensión a escenarios multiusuario.

Acknowledgments. Este resultado ha sido respaldado por el proyecto PID2021-127275OB-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER, una manera de hacer Europa".

Disclosure of Interests. Los autores declaran no tener intereses en conflicto.

Referencias

1. Rodríguez, N.D.: Semantic and Fuzzy Modelling for Human Behaviour Recognition in Smart Spaces, vol. 23. IOS Press (2016)
2. Yager, R.R.: Using fuzzy measures for modeling human perception of uncertainty in AI. Eng. Appl. Artif. Intell. **87**, 103228 (2020)
3. Gayathri, K., Easwarakumar, K., Elias, S.: Fuzzy ontology based activity recognition for assistive health care using smart home. Int. J. Intell. Inf. Technol. **16**(1), 17–31 (2020)
4. Demongivert, C., Bouchard, K., Gaboury, S., et al.: Handling of labeling uncertainty in smart homes using generalizable fuzzy features. In: Proc. Conf. on Information Technology for Social Good, pp. 248–253 (2021)
5. Arrotta, L., Civitarese, G., Bettini, C.: Knowledge infusion for context-aware sensor-based human activity recognition. In: IEEE SMARTCOMP, pp. 1–8 (2022)
6. Dubey, A., Lyons, N., Santra, A., Pandey, A.: XAI-BayesHAR: A novel framework for HAR with integrated uncertainty and Shapley values. In: IEEE ICMLA, pp. 1281–1288 (2022)
7. Lu, Z.: Deep learning-based human activity recognition algorithms: A comparative study. In: IEEE ICIPCA, pp. 1041–1046 (2023)