

## Abstract (English)

The rapid development of wearable technologies has transformed human interaction with the surrounding environment. However, most existing systems remain reactive, merely collecting and processing sensor data without understanding or anticipating the situations in which users operate. The goal of this Ph.D. thesis is to address this gap by designing a Cognitive and Situation-Aware Wearable Intelligent System (SA-WCS), inspired by Endsley's model of Situation Awareness (SA) and the cognitive mechanisms of the human brain. To achieve this goal, the research begins by revisiting the theoretical foundation of SA and introduces computational approaches for SA systems, which describe how humans perceive, comprehend, and project environmental information to make adaptive decisions. Building on these principles and computational approaches, this study introduces the SA-WCS reference architecture, a multilayered computational framework that emulates the three cognitive layers of SA. Each layer defines a fundamental cognitive function: the perception layer recognizes human activities from multimodal wearable sensor data, the comprehension layer interprets contextual information to identify meaningful situations, and the projection layer anticipates future states and supports proactive adaptation.

At the perception level, the system recognizes human activities from heterogeneous wearable devices using machine learning and context-aware feature selection. The comprehension layer extends this understanding through context representation models to identify meaningful situations by developing context recognition techniques, evolving from expert-driven Context Space Theory (CST) and fuzzy inference systems to a data-driven Context Space Theory (DD-CST) technique, enabling the autonomous discovery of contextual relationships. Both perception and comprehension interact continuously, mirroring the human cognition. To support this interaction, we introduced an adaptive Feedback Loop that allows comprehension to refine perception in real time by adapting sensing rates and feature selection based on the current situation. This feedback mechanism enhances energy efficiency and mirrors selective human attention by continuously prioritizing relevant sensory inputs.

Furthermore, the architecture is extended with a Situation-Aware Generative Sensing Layer to overcome the limitations of data imbalance and sparse contextual coverage. This layer can synthesize realistic multimodal data using conditional generative modeling. This enhancement supports the cognitive loop between perception and comprehension, enabling the system to learn effectively, even in data-scarce scenarios. At the last level (Projection), the framework empowers the system to anticipate future situations by analyzing the sequential dependencies among recognized situations. Several data mining techniques, such as Sequential Pattern Mining (SPM) and Sequential Rule Mining (SRM), have been employed to construct a causality-based prediction framework, offering a machine interpretation of the human ability to anticipate what comes next.

Moreover, the proposed architecture was evaluated using real-world datasets, such as Extrasensory, DOMINO, and clinical sensor data (HYPERAKTIV), consistently outperforming traditional one-step machine learning models in terms of accuracy, balanced recognition, and computational efficiency. This strong empirical performance demonstrates the robustness and generalizability of the SA-WCS framework in diverse environments and sensing modalities. In addition to these evaluations, the proposed architecture (SA-WCS) was validated in the healthcare domain using Granular Situation-Aware Multimodal ADHD Recognition Technology (G-SMART), which integrates physiological (HRV) and behavioral (activity) signals to monitor Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) symptoms in a temporally and situationally aware manner. This application demonstrates how cognitive principles, data granularity, and multimodal

fusion can jointly enhance the explainability, reliability, and personalization of health monitoring. In conclusion, this thesis presents a cognitive framework for Situation-Aware Wearable Intelligence, where perception, comprehension, and projection operate as interdependent processes connected through an adaptive feedback loop. The proposed architecture advances wearable computing from reactive sensing toward trustworthy, explainable, and generative intelligence, marking a decisive step toward next-generation human-centric intelligent systems capable of sensing like machines and reasoning like humans.

**Keywords:** Situation Awareness; Wearable Intelligence; Wearable Computing System; Context Recognition; Human Activity Recognition; Multimodal Fusion; Healthcare Monitoring; Cognitive Computing

## **Abstract(Italian)**

Il rapido sviluppo delle tecnologie indossabili ha trasformato l'interazione umana con l'ambiente circostante. Tuttavia, la maggior parte dei sistemi esistenti rimane reattiva, limitandosi a raccogliere ed elaborare dati sensoriali senza comprendere o anticipare le situazioni in cui gli utenti operano. L'obiettivo di questa tesi di dottorato è colmare questa lacuna progettando un Sistema Intelligente Indossabile Cognitivo e Consapevole della Situazione (SA-WCS), ispirato al modello di Situation Awareness (SA) di Endsley e ai meccanismi cognitivi del cervello umano. Per raggiungere tale obiettivo, la ricerca inizia riesaminando le basi teoriche della SA e introduce approcci computazionali per i sistemi SA, che descrivono come gli esseri umani percepiscono, comprendono e proiettano le informazioni ambientali per prendere decisioni adattive. Sulla base di questi principi e approcci computazionali, questo studio introduce l'architettura di riferimento SA-WCS, un framework computazionale multilivello che emula i tre livelli cognitivi della SA. Ogni livello definisce una funzione cognitiva fondamentale: il livello di percezione riconosce le attività umane a partire da dati multimodali provenienti da sensori indossabili; il livello di comprensione interpreta le informazioni contestuali per identificare situazioni significative; il livello di proiezione anticipa stati futuri e supporta un adattamento proattivo.

A livello di percezione, il sistema riconosce le attività umane da dispositivi indossabili eterogenei utilizzando tecniche di apprendimento automatico e selezione di caratteristiche sensibili al contesto. Il livello di comprensione estende tale conoscenza attraverso modelli di rappresentazione del contesto per identificare situazioni significative, sviluppando tecniche di riconoscimento del contesto che evolvono da approcci basati su esperti, come la Context Space Theory (CST) e i sistemi di inferenza fuzzy, verso una tecnica guidata dai dati, la Data-Driven Context Space Theory (DD-CST), che consente la scoperta autonoma delle relazioni contestuali. Percezione e comprensione interagiscono continuamente, rispecchiando la cognizione umana. Per supportare questa interazione, è stato introdotto un ciclo di retroazione adattivo (Feedback Loop) che permette alla comprensione di affinare la percezione in tempo reale, adattando la frequenza di campionamento e la selezione delle caratteristiche in base alla situazione corrente. Questo meccanismo di feedback migliora l'efficienza energetica e riproduce l'attenzione selettiva umana, dando priorità continua agli input sensoriali più rilevanti.

Inoltre, l'architettura è stata estesa con un livello di Generazione Sensibile alla Situazione per superare i limiti legati allo sbilanciamento dei dati e alla scarsa copertura contestuale. Questo livello è in grado di sintetizzare dati multimodali realistici mediante modelli generativi condizionati. Tale miglioramento supporta il ciclo cognitivo tra percezione e comprensione, consentendo al sistema di apprendere efficacemente anche in scenari con scarsità di dati. Nell'ultimo livello (proiezione), il framework consente al sistema di anticipare situazioni future analizzando le dipendenze sequenziali tra le situazioni riconosciute. Sono state impiegate diverse tecniche di data mining, come Sequential Pattern Mining (SPM) e Sequential Rule Mining (SRM), per costruire un framework predittivo basato sulla causalità, offrendo un'interpretazione computazionale della capacità umana di anticipare ciò che accadrà.

Inoltre, l'architettura proposta è stata valutata utilizzando dataset reali, come Extrasensory, DOMINO e dati clinici (HYPERAKTIV), superando costantemente i modelli tradizionali di apprendimento automatico a singolo stadio in termini di accuratezza, riconoscimento bilanciato ed efficienza computazionale. Questi risultati empirici dimostrano la robustezza e la generalizzabilità del framework SA-WCS in ambienti e modalità di rilevamento diversi. Oltre a queste valutazioni, l'architettura proposta (SA-WCS) è stata validata nel dominio sanitario mediante la tecnologia Granular Situation-Aware Multimodal ADHD

Recognition (G-SMART), che integra segnali fisiologici (HRV) e comportamentali (attività) per monitorare i sintomi del Disturbo da Deficit di Attenzione/Iperattività (ADHD) in modo temporale e situazionale. Questa applicazione dimostra come i principi cognitivi, la granularità dei dati e la fusione multimodale possano migliorare congiuntamente l'interpretabilità, l'affidabilità e la personalizzazione del monitoraggio sanitario.

In conclusione, questa tesi presenta un framework cognitivo per l'intelligenza indossabile consapevole della situazione, in cui percezione, comprensione e proiezione operano come processi interdipendenti connessi attraverso un ciclo di feedback adattivo. L'architettura proposta rappresenta un avanzamento significativo nel campo del wearable computing, passando da un approccio reattivo a un'intelligenza generativa, affidabile e spiegabile, segnando un passo decisivo verso sistemi intelligenti di nuova generazione, centrati sull'uomo, capaci di percepire come macchine e ragionare come esseri umani.

**Parole chiave:** Consapevolezza della Situazione; Intelligenza Indossabile; Sistemi di Wearable Computing; Riconoscimento del Contesto; Riconoscimento delle Attività Umane; Fusione Multimodale; Monitoraggio Sanitario; Calcolo Cognitivo.