

UNIVERSITY OF SALERNO



DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

PH.D. COURSE IN INDUSTRIAL ENGINEERING
CURRICULUM IN ELECTRONIC ENGINEERING
XXXIII CYCLE

SITUATION-AWARE CYBER-PHYSICAL-SOCIAL SYSTEM FOR CULTURAL HERITAGE PROTECTION

Supervisor

Chiar.mo Prof. Massimo De Santo

Ph.D. Student

Rosario Gaeta

Scientific Referees

Chiar.mo Prof. Marco Carratù

Chiar.mo Prof. Gian Domenico Licciardo

Ph.D. Course Coordinator

Chiar.mo Prof. Massimo De Santo

SINTESI TESI

Le *cultural heritage critical infrastructures* (CHCIs), tra cui siti archeologici, musei e strutture storiche, sono fondamentali per l'identità e l'economia di un Paese. La loro tutela è un imperativo etico che, al contempo, sostiene l'occupazione e l'attrattività dei territori. Tuttavia, la conservazione è minacciata dall'invecchiamento dei materiali, da eventi meteorologici estremi e da altri fenomeni ambientali, oltre che dai visitatori, che possono causare danni in modo involontario o intenzionale. Per questo le CHCIs richiedono ispezioni e manutenzione regolari. Tradizionalmente tali procedure sono svolte da operatori umani e risultano spesso lente, soggette a errori e dispendiose in termini di risorse. Ad esempio, se il tetto di una struttura coperta che ospita affreschi di inestimabile valore subisce un danno, intervenire tempestivamente è essenziale; altrimenti, un singolo temporale o piogge prolungate possono provocare perdite gravissime.

Allo stesso tempo, nella manutenzione delle CHCIs non tutto può essere automatizzato. Le decisioni finali devono sempre spettare agli operatori umani, poiché ogni intervento va motivato e le priorità dei piani di manutenzione devono essere valutate da esperti. È dunque indispensabile un approccio metodologico Human Machine: l'utente mantiene la responsabilità ultima, mentre la sua Situation Awareness viene supportata attivamente e mantenuta a un livello elevato tramite nuove tecnologie che riducono il carico di lavoro e ottimizzano l'esecuzione delle attività.

Proponiamo di considerare il sistema complessivo, comprendente la CHCI, gli operatori e i visitatori che vi interagiscono, e le tecnologie di supporto, come un Cyber Physical Social System (CPSS). In particolare, introduciamo un nuovo approccio metodologico CPSS situation aware per la protezione del patrimonio culturale, adattabile e replicabile da soggetti pubblici e privati. La sua implementazione si basa su sensori e paradigmi di acquisizione dati, sull'Intelligenza Artificiale (AI) per automatizzare e accelerare il riconoscimento di situazioni di rischio e criticità manutentive, e su interfacce adattive capaci di presentare in modo efficace le informazioni raccolte.

La nostra ricerca si apre con una rassegna dello stato dell'arte sull'uso dell'AI nella conservazione dei beni culturali, con l'obiettivo di individuare le

tecnologie più moderne ed efficaci da integrare nel modello. Per riconoscere il rischio è necessario anche modellare la situazione. Sulla base della letteratura, introduciamo un Cultural Heritage Vulnerability Index (CHVI) guidato dagli obiettivi, calcolato mediante la Context Space Theory (CST), per valutare la vulnerabilità di aree e strutture in funzione delle criticità manutentive individuate e delle condizioni ambientali.

Il lavoro integra inoltre e valuta una tecnica innovativa di data imputation, basata su regole di associazione e granular computing, per ricostruire i valori mancanti e garantire una percezione più accurata dell'ambiente della CHCI. L'approccio è testato su dataset IoT reali, consolidati in letteratura. Il riconoscimento automatico, rapido ed efficace delle criticità manutentive è ulteriormente potenziato da un nuovo metodo sostenibile per identificare danni e vegetazione infestante sui tetti di strutture archeologiche, valutato su dataset relativi al sito di Pompei.

Tutti questi elementi confluiscono in VERGIL, una piattaforma CPSS progettata per supportare gli operatori umani a Pompei. VERGIL include un'interfaccia adattiva con un innovativo approccio di Oscillatory Goal Suggestion che, in situazioni di emergenza, reindirizza l'attenzione dell'utente verso gli elementi che richiedono azione urgente, evitando al contempo distrazioni non necessarie quando la situazione non lo richiede. Infine, VERGIL viene valutato tramite la Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) in diversi scenari ambientati a Pompei, verificando con operatori umani se il sistema supporta efficacemente la loro Situation Awareness e le capacità decisionali.

THESIS ABSTRACT

Cultural heritage critical infrastructures (CHCIs), including archaeological sites, museums, and historic structures, are vital to a country's identity and economy. Safeguarding them is an ethical imperative that also supports employment and territorial attractiveness. Yet their preservation is threatened by aging materials, extreme weather and other environmental phenomena, and visitors who may cause damage, unintentionally or maliciously. CHCIs therefore require regular inspection and maintenance. These procedures are traditionally performed by humans and are often slow, error-prone, and resource-intensive. For example, if the roof of a covered structure containing priceless frescoes is damaged, prompt action is crucial; otherwise, a single storm or prolonged rainfall could cause severe loss.

At the same time, in CHCI maintenance not everything can be automated. Final decisions must always be made by human operators, since any intervention must be justified and priorities in maintenance plans must be assessed by experts. A Human-Machine methodological approach is therefore essential: the user retains final responsibility, while their Situation Awareness is actively supported and maintained at a high level through new technologies that reduce workload and optimize task performance.

We propose to see the overall system, comprising the CHCI, the operators and visitors who interact with it, and the supporting technologies, as a Cyber-Physical-Social System (CPSS). In particular, we propose a novel Situation-Aware CPSS methodological approach for cultural heritage protection that can be adapted and replicated by public and private actors. Its implementation relies on sensors and data-acquisition paradigms, Artificial Intelligence (AI) to automate and accelerate the recognition of risk situations and maintenance issues, and adaptive interfaces capable of presenting the information gathered.

Our research begins with a state-of-the-art review of AI for cultural heritage preservation to identify the most modern and effective technologies to integrate into the model. To recognize risk, the situation must also be modeled. Building on the literature, we introduce a goal-driven Cultural Heritage Vulnerability Index (CHVI), computed using Context Space Theory (CST), to assess the vulnerability of areas and structures based on identified maintenance issues

and environmental conditions.

The work also incorporates and evaluates an innovative data imputation technique based on association rules and granular computing to reconstruct missing data and ensure a more accurate perception of the CHCI environment. The approach is tested on real-world IoT datasets established in the literature. Automatic, rapid, and effective recognition of CHCI maintenance issues is further achieved through a novel sustainable method for identifying damage and weedy vegetation on the roofs of archaeological structures, evaluated on datasets related to the Pompeii archaeological site.

All these elements converge in VERGIL, a CPSS platform designed to support human operators at Pompeii. VERGIL includes an adaptive interface with a novel Oscillatory Goal Suggestion approach that, in emergency situations, redirects the user's attention to elements requiring urgent action, while avoiding unnecessary distraction when the situation does not require it. Finally, VERGIL is evaluated using the Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT) across multiple scenarios set at Pompeii, testing with human operators whether the system effectively supports their Situation Awareness and decision-making abilities.