

# Scenari innovativi nel rilievo e monitoraggio architettonico con LiDAR a stato solido e sistemi ADC

Massimiliano Campi  
Valeria Cera  
Marika Falcone

## Abstract

Dal 2000 l'avanzamento tecnologico ha compiuto passi da gigante nello sviluppo di sensori e algoritmi sempre più performanti che consentono la documentazione, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale.

In particolare, se qualche decennio fa i laser scanner statici rappresentavano le nuove frontiere del rilievo, oggi i sensori LiDAR dinamici a stato solido e i sistemi automatici di cattura dei dati ADC - *Automated Data Collection* definiscono la nuova tappa di un percorso di perfezionamento dei tradizionali sistemi *reality-based*. Sulla base di tali premesse, il presente contributo vuole mostrare come tali apparati strumentali mostrano potenzialità di applicazione inedite che orientano a nuove sfide e nuovi scenari operativi anche in altri ambiti disciplinari in cui diventa necessario fare delle riflessioni critiche in termini di performance, di accessibilità, di affidabilità e di costi relativamente contenuti.

## Parole chiave

rilievo dinamico, LIDAR, sistemi ADC, monitoraggio, rilievo predittivo

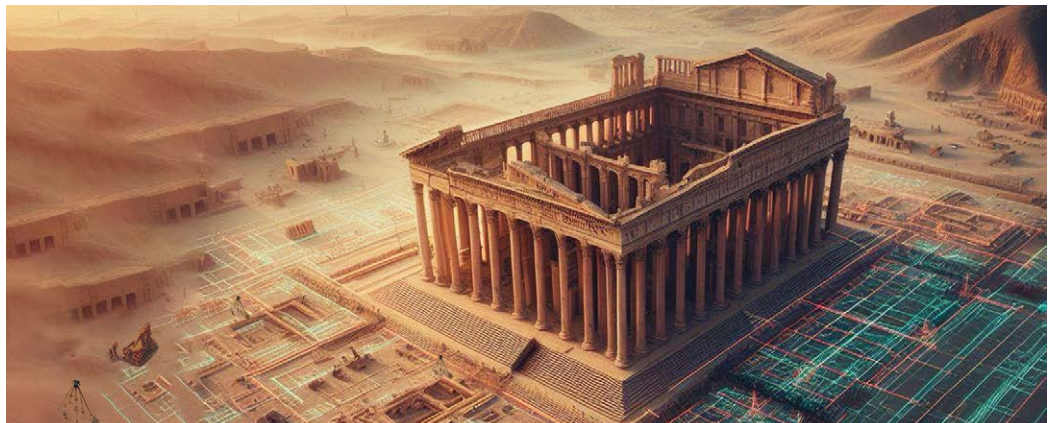


Immagine sintetica  
sull'evoluzione delle  
frontiere del rilievo.  
Immagine creata con IA.  
Elaborazione degli autori.

## Introduzione

Dal 2000 l'evoluzione digitale e le tecniche di rilevamento tridimensionale hanno compiuto passi da gigante nello sviluppo di sensori e algoritmi sempre più performanti che consentono la documentazione, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale. In particolare, se qualche decennio fa i laser scanner statici rappresentavano le nuove frontiere del rilievo, oggi i sensori LiDAR dinamici a stato solido e i sistemi automatici di cattura dei dati ADC - *Automated Data Collection* [Bocca and Baek 2019] definiscono la nuova tappa di un percorso di perfezionamento dei tradizionali sistemi *reality-based*. Tali apparati, nella loro capacità di catturare valori materiali e immateriali, consentono di prefigurare nuovi potenziali scenari di rilevamento in molti domini applicativi quali l'ambiente costruito e urbano, i beni culturali e l'archeologia, il monitoraggio e altro ancora. Le loro potenzialità risiedono nello sviluppo di sensori che stanno subendo un processo di avanzamento tecnologico in termini di performance, di accessibilità, di affidabilità e di costi relativamente contenuti. A livello teorico, si tratta di sistemi *low-cost* che, a causa dei diversi metodi di scansione, possono essere classificati come solidi o ibridi. I sistemi a stato solido che non hanno componenti meccaniche rotanti sono principalmente gli *OPA Scanner - Optical Phased Array* impiegati oggi per le auto a guida autonoma e i *LiDAR Flash*, integrati su smartphone, con sensore di dimensioni sub-centimetriche e con un raggio di acquisizione di circa 4m, comunemente impiegati nell'ambito della realtà aumentata. Allo stato attuale vengono utilizzati i sistemi LiDAR ibridi (*Hibrid solid-state*) che possono essere di tre tipologie: i) MEMMS; ii) *2D scanning mirror*; iii) *1D rotating mirror* anch'essi impiegati nel campo automobilistico [Nam and Gon-Woo 2021]. Sulla base di tali premesse, le siffatte tecnologie si prestano a molteplici utilizzi tali da ampliare gli scenari già esistenti nel campo architettonico prefigurando, al contempo, nuovi scenari operativi in cui la verifica della misura resta centrale nelle sperimentazioni atte a validarne o meno l'uso, anche nella comparazione con le esperienze passate.

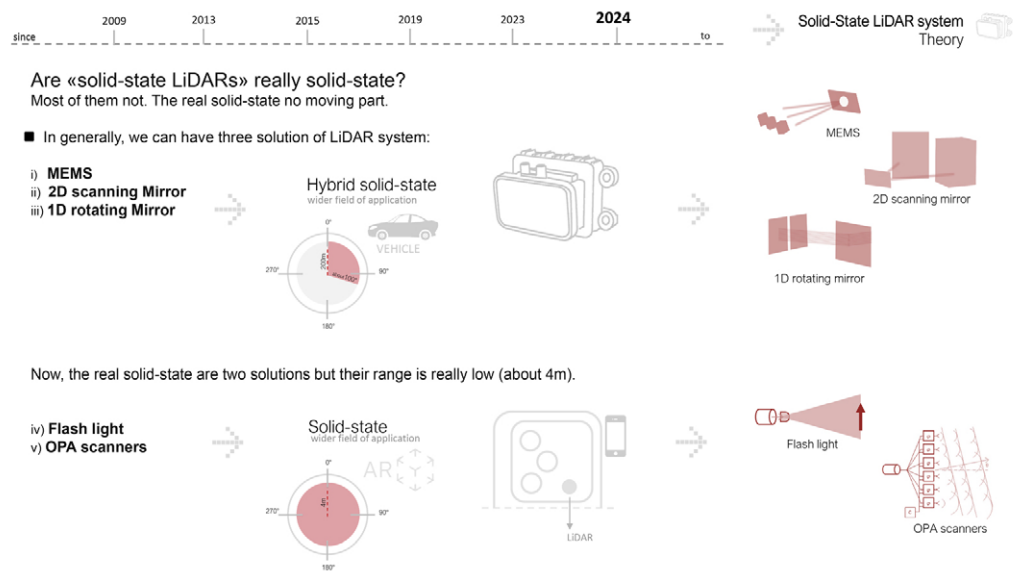


Fig. 1. Panoramica sui LiDAR allo stato solido, nuova frontiera nella digitalizzazione del reale. Elaborazione degli autori.

## Sperimentazioni a confronto sull'evoluzione dei sensori range-based

L'analisi critica delle potenziali ricadute nel campo dell'Architettura dell'evoluzione della sensoristica non può non essere il centro dell'attività scientifica di una comunità che traguarda la ricerca come campo privilegiato di avanzamento della conoscenza. Proprio per questo, alcuni processi determinatisi negli anni e quelli prefigurati in questo saggio [1] sono già stati oggetto di sperimentazioni effettuate dal gruppo di ricerca coordinato dal Prof. M. Campi nelle attività del Centro di Ricerca Urban/Eco e nel laboratorio TIR del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (fig. 2). Nel 2009, nell'ambito di

una operazione di digitalizzazione a scala urbana che ha interessato l'area di piazza Plebiscito e del Teatro San Carlo di Napoli [2], si prevedeva già di utilizzare i dati acquisiti in movimento, sfruttando sensori a bordo di veicoli, per generare un database utile al monitoraggio architettonico (fig. 3). L'installazione del Lynx Mobile Mapper della Optech sul tetto di una automobile ha permesso di acquisire brani di città sfruttando la combinazione di quattro moduli: un sensore laser, un sistema satellitare GPS, una IMU *Inertial Measurement Unit* e un DMI *Distance Measurement Instrument*, definendo di fatto una forma prototipale di quanto in tempi molto più recenti si sta teorizzando e sperimentando con i LiDAR a stato solido nel campo dell'*automotive* [Cappellini and Campi 2011].

La necessità, già avvertita, di velocizzare tramite il movimento la fase di raccolta dei dati si è poi, successivamente, concretizzata in maniera più fattuale con lo sviluppo, e conseguente commercializzazione, di soluzioni progettate *ad hoc*, grazie alla contestuale codificazione di algoritmi SLAM. Una delle prime possibilità strumentali immesse sul mercato è stato lo Zeb1 dell'azienda GeoSLAM, sperimentata dal gruppo di ricerca Urban/Eco in occasione dello studio condotto sulla Grotta di Seiano nel 2016 [3] (fig. 4). All'epoca le potenzialità di una acquisizione dinamica furono subito colte nei loro risvolti positivi, soprattutto in termini di abbattimento dei tempi dell'operazione quando condotta su architetture particolarmente

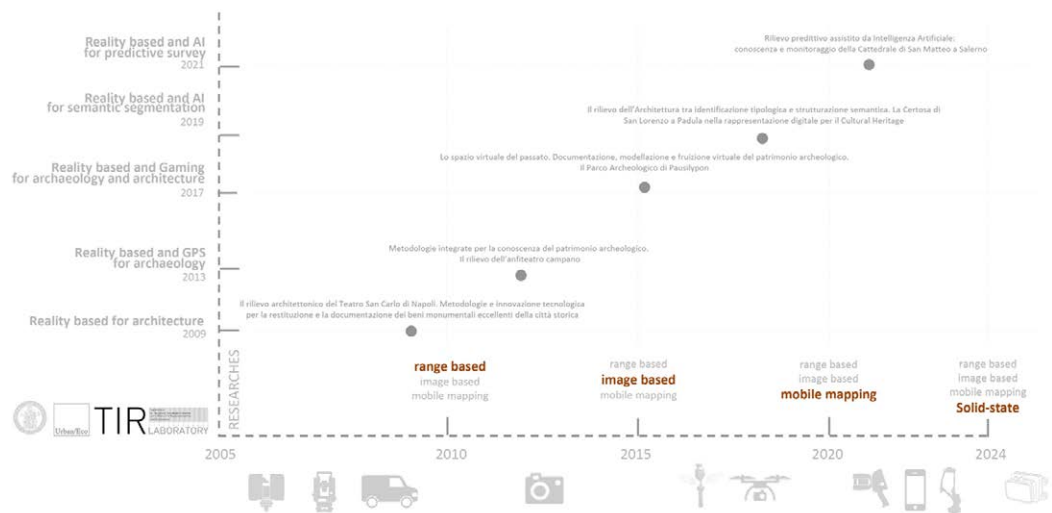


Fig. 2. Sintesi delle principali sperimentazioni effettuate dal gruppo di ricerca e indicazione della tecnologia prevalente. Elaborazione degli autori.



Fig. 3. Sintesi della sperimentazione in Piazza del Plebiscito a Napoli. Elaborazione degli autori.

estese; tuttavia, la tecnologia era in fase di sviluppo per cui il riscontro dal punto di vista della precisione del dato metrico risultava ancora non pienamente soddisfacente [Farella et al. 2016]. Per questo, la ricerca è proseguita l'anno successivo con l'applicazione di un'altra strumentazione, il TIMMS della Trimble coordinata dalla prof. di Luggo insieme al prof. Campi [4], capace di digitalizzare un manufatto tramite movimento grazie all'installazione di un laser scanner statico montato su un carrello e coadiuvato da una IMU (fig. 5). Lo studio, effettuato sul caso del complesso di Monte Sant'Angelo a Napoli, ha permesso di effettuare diversi test su alcune diverse e possibili condizioni di acquisizione, comparando i risultati ottenuti in termini di pulizia e correttezza topologica della nuvola di punti [Campi et al. 2018]. Gli esiti delle valutazioni erano indubbiamente promettenti, sebbene le soluzioni fossero ancora giovani e, soprattutto, non facilmente accessibili in termini economici. Dal punto di vista, poi, dell'accuratezza del dato metrico il divario con soluzioni statiche persisteva; motivo per il quale i successivi studi sono stati sviluppati concentrandosi sull'impiego di sensori TLS, sia a modulazione di fase che T.O.F. Esperienze come quella del PRIN CHROME [5], è stata infatti condotta insieme all'unità di ricerca informatica impostando la digitalizzazione dei casi studio, le tre certose della Campania, sulla integrazione di sensori *reality-based* (fig. 6) e adottando

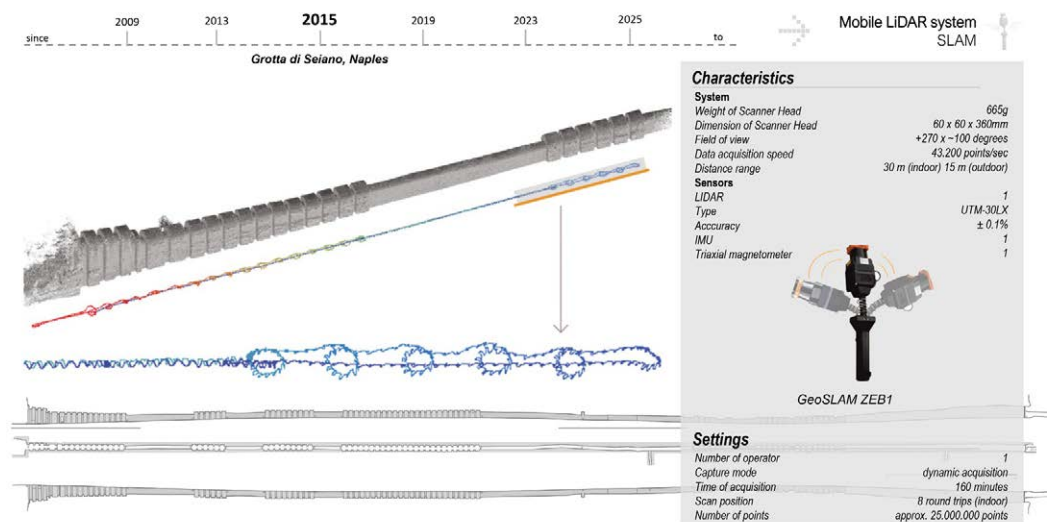


Fig. 4. Sintesi della sperimentazione condotta sulla Grotta di Seiano, a Napoli. Elaborazione degli autori.



Fig. 5. Sintesi della ricerca sul complesso universitario di Monte Sant'Angelo, a Napoli. Elaborazione di M. Siconolfi and S. Monaco.



come riferimento metrico il modello discreto acquisito con un FARO Focus3D S120 [Campi 2017; Campi et al. 2018]. Similmente, studi comparativi sulla combinazione di dati acquisiti con sensori diversi sono stati prodotti sul caso studio di Palazzo Donn'Anna a Napoli, ricerca condotta con la prof. A. di Luggo nel 2019 [6], eligendo a *dataset* di riferimento quello registrato con un tempo di volo, il Riegl VZ400i (fig. 7) [di Luggo et al. 2019]. Sul finire, però, del primo ventennio del XXI secolo i progressi registrati nel perfezionamento tanto degli algoritmi di localizzazione e mappatura simultanea quanto nella realizzazione di LiDAR sempre più performanti, hanno sensibilmente modificato gli scenari operativi. Sicché nel 2020 è maturata l'occasione per il gruppo di sperimentare una soluzione tecnologica che, ad oggi, conferma di essere tra le più prestanti nel panorama del rilievo dinamico, il VLX della NavVis. La digitalizzazione della Cattedrale di San Matteo a Salerno [7] ha, infatti, fornito la possibilità di valutare la nuvola di punti ottenuta grazie a due sensori lidar montati su un esoscheletro, indossato dall'operatore in movimento (fig. 8) [Campi et al. 2022]. Contestualmente, il mercato sta palesando in maniera sempre più consistente la commercializzazione di nuovi strumenti di rilievo dinamico, connotati da un rapporto qualità/prezzo sensibilmente vantaggioso. Con il proposito di appurare questa tendenza, nell'ultimo anno è

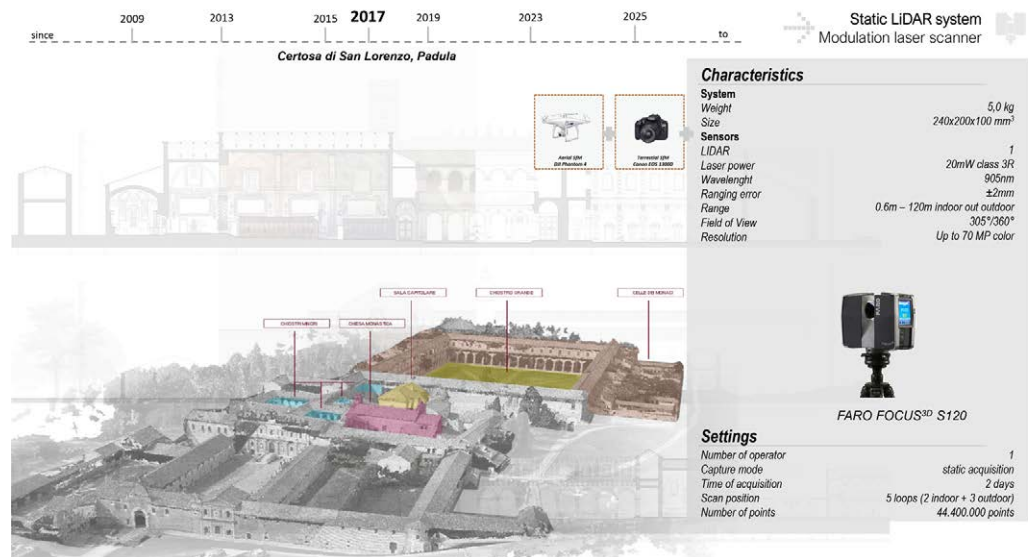


Fig. 6. Sintesi dello studio sulla Certosa di San Lorenzo, a Padula. Rielaborazione dell'autrice V. Cera.

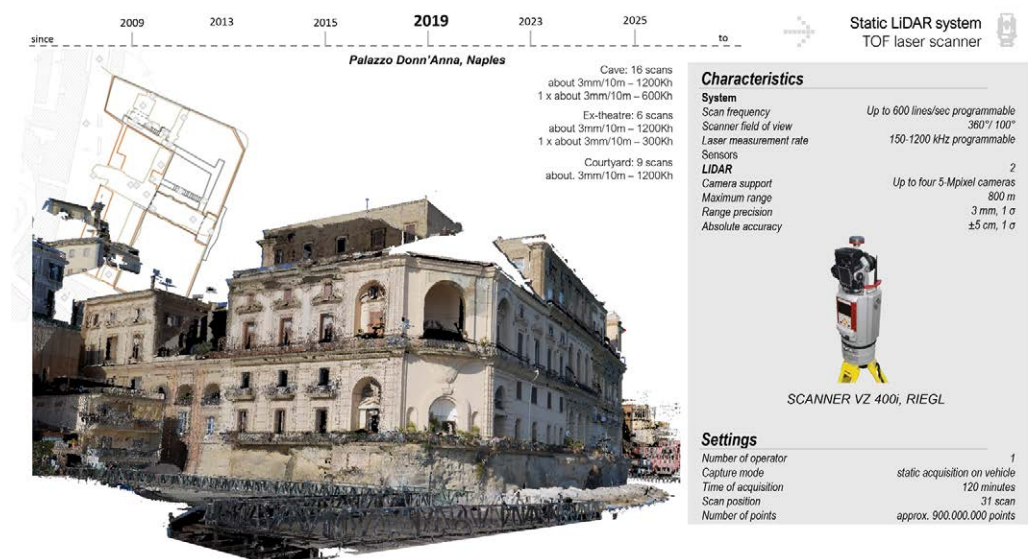


Fig. 7. Sintesi della sperimentazione effettuata su Palazzo Donn'Anna. Elaborazione di F. Pisano, S. Scandurra and M. Pulcrano.

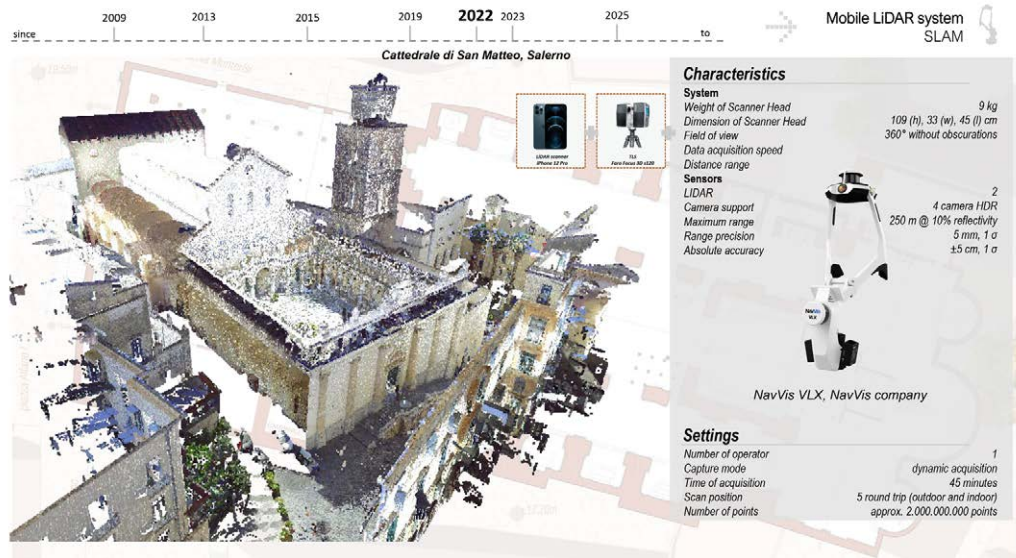


Fig. 8. Sintesi della ricerca sulla Cattedrale di San Matteo, a Salerno. Elaborazione dell'autore M. Falcone.



Fig. 9. Sintesi della sperimentazione in corso sul complesso monumentale di Sant'Anna dei Lombardi. Elaborazione degli autori con F. Battimelli.

stata avviata una sperimentazione sul complesso monumentale di Sant'Anna dei Lombardi a Napoli, nell'ambito del Comitato Scientifico Italiano CIPA-HD dell'ICOMOS [8]. Nello specifico, la ricerca sta occupandosi della definizione di un protocollo operativo di digitalizzazione basato sul confronto strumentale da cui codificare delle linee guida. Ad oggi, il complesso di Sant'Anna è stato discretizzato impiegando sia sensori a modulazione di fase con stazioni fisse sia un LiDAR dinamico del tipo Zeb Horizon della GeoSLAM (fig. 9). L'analisi dei dati è in corso ma i primi risultati testimoniano indubbiamente la maturità raggiunta nello sviluppo di soluzioni *mobile*, capaci ora di garantire una raffinatezza maggiore nel dato metrico, con un costo della strumentazione sempre più accessibile.

### I sensori a stato solido. Nuove frontiere di ricerca per il monitoraggio urbano

Negli ultimi anni la diffusione dei sensori LiDAR ha rivoluzionato l'acquisizione dei dati 3D. Dagli anni '90 ad oggi, questa tecnologia si è notevolmente evoluta e le sue multiformi potenzialità ne hanno consentito un sempre più rapido sviluppo in diversi campi di applicazione.

Recentemente, uno dei più importanti risultati ottenuti nella tecnologia di scansione laser sono i sistemi a stato solido, aventi la capacità di ottenere informazioni morfo-metriche della scena rilevata attraverso i veicoli motorizzati.

Sulla base di tali premesse, nell'ultimo anno il gruppo di ricerca ha avviato un nuovo filone di indagine che vede i suoi primi sviluppi nel progetto DUPIN *Deductive Unit in Predictive Intelligence Network* il cui obiettivo è quello di evidenziare come sia possibile sviluppare soluzioni innovative che forniscono informazioni legate all'ambiente urbano. In questa prospettiva, la ricerca - concepita e coordinata dai ricercatori del Dipartimento di Architettura (DIARC) e del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" [9] - mira a costruire un sistema di monitoraggio per il patrimonio, costruito e urbano, basato su sensori eterogenei derivanti dal traffico veicolare (fig. 10).

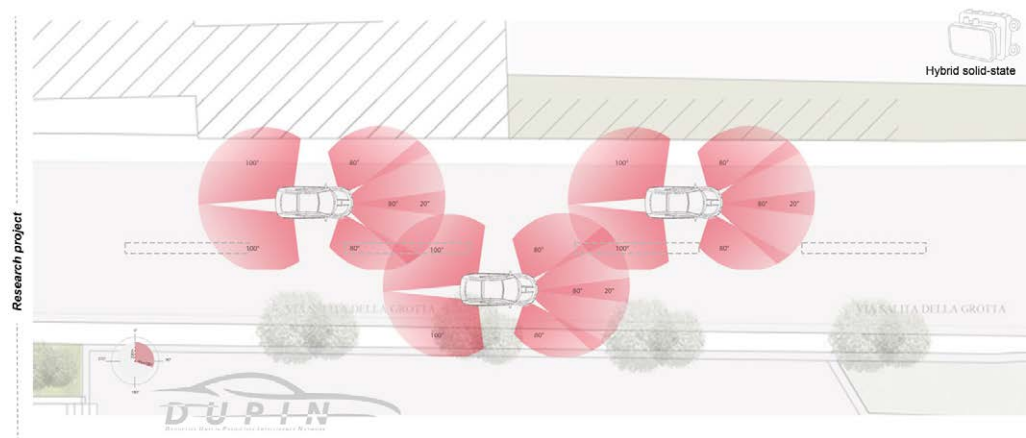


Fig. 10. Sintesi della idea progettuale "DUPIN *Deductive Unit in Predictive Intelligence Network*". Elaborazione degli autori.

In particolare, si propone di delineare una innovativa metodologia d'indagine attraverso la progettazione di un sistema digitale informativo che integri al parco auto sistemi ottici, come sensori a stato solido, sensori ambientali in grado di raccogliere dati territoriali e informazioni legate al costruito, in modo continuo e diffuso, e tecniche di Intelligenze Artificiali per identificare danni strutturali, degradi superficiali e variazioni ambientali che possono influenzare la conservazione del patrimonio urbano. In tale ambito d'indagine, è fondamentale osservare che la strategia utilizzata pone le sue radici nel campo del monitoraggio dei beni architettonici, sfruttando le tecniche e metodologie comunemente utilizzate coadiuvate da *detection* attraverso reti neurali convoluzionali, che sono largamente applicate con successo in settori diversi da quello di interesse nella presente ricerca, dal campo biomedico a quello della guida autonoma. Infatti, i veicoli moderni presentano enormi vantaggi e potenzialità tanto da essere considerati dei veri e propri 'database di dati' in grado di raccogliere informazioni non solo per l'ambito dell'*automotive* ma anche per il monitoraggio del patrimonio architettonico e urbano che li circonda.

Per avere un riscontro preliminare della bontà della procedura, il gruppo di ricerca, nel rispetto delle proprie competenze interdisciplinari, ha già avviato collaborazioni nonché campagne sperimentali in laboratorio i cui esiti hanno consentito di dettagliare le tecnologie da mettere in campo e di attuare, al contempo, protocolli di indagine. In questa prospettiva, la fase di sperimentazione si è concentrata sul monitoraggio di un 3D set allestito con plastici architettonici in scala 1:100 mediante l'analisi dei sensori a stato solido LiDAR Flash su iPhone 12 Pro e 12 Pro Max, montati con supporto in stampa 3D, su un veicolo radiocomandato. Successivamente i dati raccolti sono diventati il database di partenza per sviluppare un algoritmo di rilevamento, basato sull'utilizzo dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico [Falcone and Dell'Annunziata Napolitano 2023] (fig. 11). I risultati ottenuti per questo *case study* sono stati estremamente incoraggianti mostrando la bontà dell'approccio proposto nel nuovo filone di ricerca.

Pertanto, in questa prospettiva le soluzioni e gli strumenti proposti per lo "stato di salute" del costruito urbano da traffico veicolare consentiranno, infatti, di avviare il processo di mo-



monitoraggio in tempo reale dei contesti urbani supportando, al contempo, i processi legati all'attività preventiva (diagnostica) e di rigenerazione.

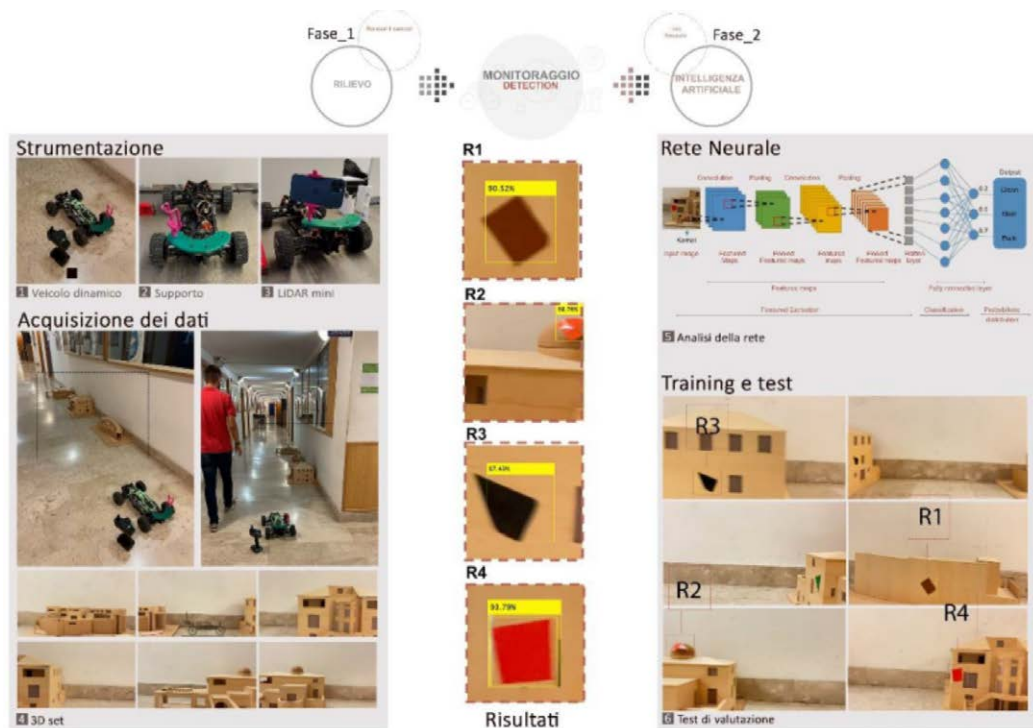


Fig. 11. Sintesi della sperimentazione per il progetto "DUPIN Deductive Unit in Predictive Intelligence Network". Elaborazione dell'autore M. Falcone con G. Napolitano.

## Conclusioni

L'avanzamento tecnologico consente oggi la produzione di apparati strumentali altamente performanti che, seppur non originariamente ideati per l'Architettura, mostrano potenzialità di applicazione inedite che aprono la ricerca nella sperimentazione di codesti sistemi anche in altri settori disciplinari. Pertanto, questi nuovi filoni di ricerca orientano a nuove sfide e nuovi scenari operativi in cui diventa necessario fare delle riflessioni critiche in base alle tecnologie da mettere in campo. Particolare cura dovrà essere posta all'analisi approfondita della misura sia in termini qualitativi, a partire dalla potenziale pericolosa ridondanza del dato (la dismisura) nonché in termini quantitativi sulla accuratezza e precisione della misura stessa, che diviene ora non solo prerogativa dell'Architettura ma anche di nuovi ambiti applicativi di sperimentazione.

## Riconoscimenti

Gli autori, tutti variabilmente parte delle ricerche presentate, ringraziano le ulteriori persone coinvolte. In particolare, per la ricerca con il Lynx Mobile Mapper si ringrazia l'azienda Optech per la strumentazione e il supporto; per lo studio sulla Grotta di Seiano si ringrazia l'unità 3D Optical Metrology 3DOM della Fondazione Bruno Kessler FBK di Trento nelle persone dell'Ing. F. Remondino con E. Nocerino, F. Menna e l'azienda Mesa srl; per la sperimentazione sul complesso di Monte Sant'Angelo, si ringrazia l'azienda Trimble nelle persone di D. Marcontonio e M. Rubidio nonché la prof.ssa A. di Luggo, S. Monaco, M. Siconolfi, D. Palomba; per la digitalizzazione nell'ambito del progetto di ricerca CHROME si ringraziano i ricercatori L.A. Garcia e D. Iovane; per la ricerca su Palazzo Donn'Anna si ringraziano la prof.ssa A. di Luggo, F. Pisano, L. Repola, S. Scandurra, M. Pulcrano, D. Palomba; per la ricerca sulla Cattedrale di San Matteo si ringrazia l'azienda 3DScan nella figura di S. Sabbatini per la strumentazione e il supporto; si ringrazia per la sperimentazione sul complesso monumentale di Sant'Anna dei Lombardi l'azienda GeoSLAM nella figura di A. Cabrucci con F. Battimelli e la Cooperativa Parteneapolis nella persona di A. Giglio.



## Note

- [1] Sebbene il presente contributo sia il risultato di un lavoro condiviso V. Cera è autrice del paragrafo 1, M. Falcone è autrice del paragrafo 2, introduzione e conclusioni sono a cura di tutti gli autori.
- [2] La ricerca è stata svolta nell'ambito del PhD dell'arch. V. Cappellini con il tutorato del prof. M. Campi.
- [3] La ricerca è stata svolta nell'ambito del PhD dell'arch. E.M. Farella con il tutorato del prof. M. Campi e dell'ing. F. Remondino.
- [4] Lo studio è stato svolto nell'ambito di una più ampia ricerca sul complesso universitario condotta dal Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [5] 'CHROME Cultural Heritage Resources Orienting Multimodal Experiences' è un Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN), finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca dal 2017 al 2020. Le attività di digitalizzazione sono parte del PhD dell'arch. V. Cera con il tutorato del prof. M. Campi, del prof. F. Cutugno, del prof. J. I. San Jose Alonso.
- [6] Lo studio è stata svolta a partire dalla tesi di laurea 5UE in Architettura dell'arch. F. Pisano presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [7] La ricerca è stata svolta nell'ambito del PhD dell'arch. M. Falcone con il tutorato del prof. M. Campi, del prof. S. Di Martino, dell'ing. F. Farroni e dell'arch. S. Sabbatini.
- [8] La ricerca è coordinata dal prof. M. Campi, dal dott. A. Cabrucci e dalla prof.ssa R. A. Genovese.
- [9] La ricerca è coordinata dal prof. M. Campi e dagli ing. A. Genovese e F. Farroni con V. Cera, M. Falcone e G. Napolitano Dell'Annunziata.

## Riferimenti bibliografici

- Bocca A., Baek D. (2019). Automated Driving Systems: Key Advantages, Limitations and Risks. In *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. Torino, 2-4 luglio 2019, pp. 1-6.
- Campi M., di Luggo A., Monaco S., Siconolfi M., Palomba D. (2018). Indoor and Outdoor Mobile Mapping Systems for architectural surveys. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, pp. 201-208.
- Campi M. (2017). La Certosa di San Martino di Napoli quale scrigno di saperi architettonici ed esemplificazione monumentale per una nuova evoluzione della ricerca. In AA. VV. (a cura di). *Territori e Frontiere della Rappresentazione: Atti del 39° convegno internazionale dei Docenti delle discipline della Rappresentazione*. Napoli, 14-16 settembre 2017. Roma: Gangemi Editore, pp. 1074-1087.
- Campi M., Cera V., Iovane D., Garcia, L.A. (2018). Metodologie integrate e tecniche innovative di rilievo per la conservazione delle Certose in Campania. In R.A. Genovese (a cura di). *Patrimonio e città storiche come poli di integrazione sociale e culturale, sostenibilità e tecnologie innovative*. Napoli: Giannini Editore, pp. 401-426.
- Campi M., Falcone M., Sabbatini S. (2022). Towards continuous monitoring of Architecture. Terrestrial Laser Scanning and Mobile Mapping System for the diagnostic phases of the Cultural Heritage. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVI, pp. 121-127.
- Cappellini V., Campi M. (2011). 3D survey of the San Carlo Theatre in Naples. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-5/W16, pp. 91-97.
- di Luggo A., Campi M., Repola L., Cera V., Scandurra S., Pulcrano M., Falcone M. (2019). Evaluation of historical heritage documentation: Reality based survey and derivative models. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W17, pp. 115-122.
- Farella E., Menna F., Nocerino E., Morabito D., Remondino F., Campi M. (2016). Knowledge and valorization of historical sites through 3D documentation and modeling. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B5, pp. 255-262.
- Falcone M., Napolitano Dell'Annunziata G., (2023). A combined use of Camera Sensor and AI for Rapid Mapping Monitoring for Architecture: an Applicative Case Study. In *Nexus Network Journal*, vol. 25 (suppl. 1), pp. 423-429.
- Nam, D. V., & Gon-Woo, K. (2021). Solid-State LiDAR based-SLAM: A Concise Review and Application. In *IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing*, pp. 302-305.

## Autori

Massimiliano Campi, Università degli Studi di Napoli Federico II, campi@unina.it  
Valeria Cera, Università degli Studi di Napoli Federico II, valeria.cera@unina.it  
Marika Falcone, Università degli Studi di Napoli Federico II, marika.falcone@unina.it

Per citare questo capitolo: Massimiliano Campi, Valeria Cera, Marika Falcone (2024). Scenari innovativi nel rilievo e monitoraggio architettonico con LiDAR a stato solido e sistemi ADC/Innovative scenarios in architectural survey and monitoring using Solid State LiDAR and ADC systems. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 195-212.

# Innovative scenarios in architectural survey and monitoring using Solid State LiDAR and ADC systems

Massimiliano Campi  
Valeria Cera  
Marika Falcone

## Abstract

Since 2000, technological advancement has made great strides in the development of increasingly high-performance sensors and algorithms that allow the documentation, conservation and enhancement of cultural heritage.

In particular, if a few decades ago static laser scanners represented the new frontiers of surveying, today dynamic solid-state LiDAR sensors and automatic data capture systems ADC - Automated Data Collection define the new stage of a path of improvement of traditional reality-based systems. On the basis of these premises, this paper aims to show how these instrumental apparatuses show unprecedented application potentials that lead to new challenges and new operational scenarios also in other disciplinary areas in which it becomes necessary to make critical reflections in terms of performance, accessibility, reliability and relatively low cost.

## Keywords

dynamic survey, LIDAR, ADC systems, monitoring, predictive survey

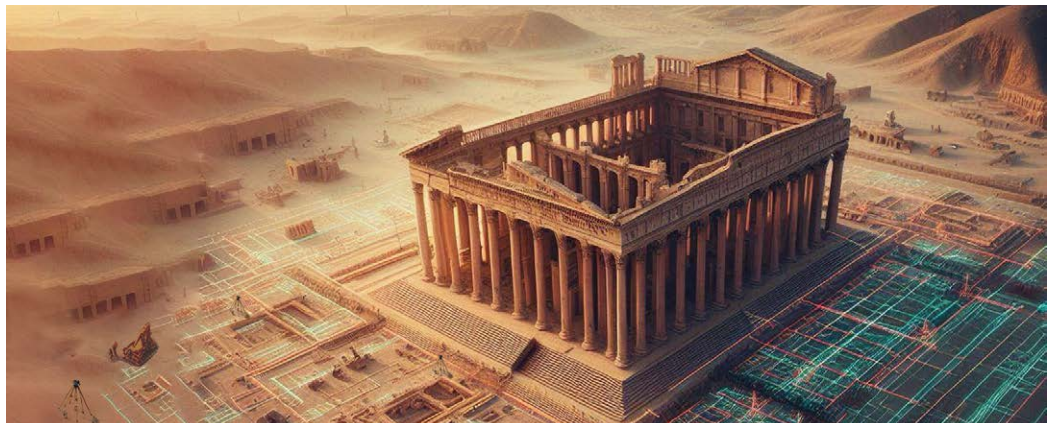


Illustration of evolving frontiers of representation. Image generated by AI. Elaboration by the authors.

## Introduction

Since 2000, digital evolution and three-dimensional surveying techniques have made great progress in the development of increasingly high-performance sensors and algorithms that enable the documentation, preservation, and enhancement of cultural heritage.

In particular, if a few decades ago static laser scanners represented the new frontiers of surveying, today dynamic solid-state LiDAR sensors and Automated Data Collection systems - ADC [Bocca and Baek 2019] define the new stage in a process of improving traditional reality-based systems. Such devices, in their ability to capture tangible and intangible values, enable the foreshadowing of potential new sensing scenarios in many application domains such as the built and urban environment, cultural heritage and archaeology, monitoring, and more. Their potential lies in the development of sensors that are undergoing a process of technological advancement in terms of performance, accessibility, reliability, and relatively low cost. At the theoretical level, these are low-cost systems that, because of different scanning methods, can be classified as solid or hybrid. The solid-state systems that do not have rotating mechanical components are mainly the OPA Scanners - Optical Phased Array used nowadays for self-driving cars and the LiDAR Flash, integrated on smartphones, with sub-centimeter-sized sensor and with an acquisition radius of about 4m, commonly used in the augmented reality domain.

At present, hybrid solid-state LiDAR systems are used which can be of three types: i) MEMS; ii) 2D scanning mirror; iii) 1D rotating mirror also employed in the automotive field [Nam and Gon-Woo 2021].

Based on these premises, such technologies lend themselves to a variety of uses such as to expand existing scenarios in the architectural field while foreshadowing new operational scenarios in which measurement verification remains central in experiments designed to validate or not validate their use, including in comparison with past experiences.

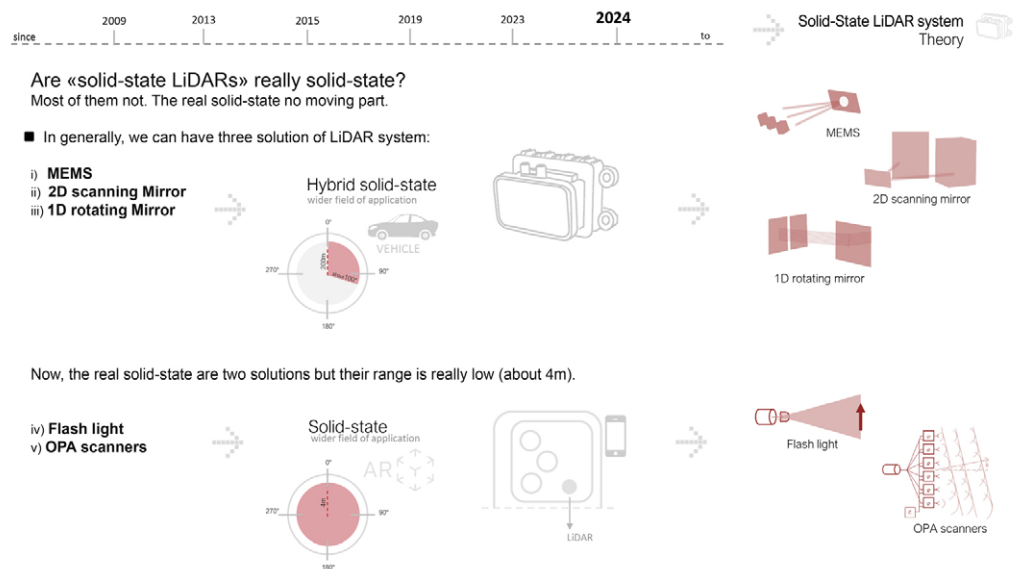


Fig. 1. Overview of solid-state LiDAR, a new frontier in the digitisation of reality. Elaboration by the authors.

## Comparing experiences on the evolution of range-based sensors

The critical analysis of the potential repercussions in the field of Architecture of the evolution of sensor technology is the focus of the scientific activity of a community that sees research as a privileged field of knowledge advancement. For this reason, some of the processes that have taken place over the years and those prefigured in this essay [1] have already been the subject of testing by the research group coordinated by Prof. M. Campi in the activities of the Urban/Eco Research Centre and the TIR laboratory of the Department of Architecture of the University of Naples Federico II (fig. 2). In 2009, as part of a digitization operation on



an urban scale involving the area of Piazza Plebiscito and the San Carlo Theatre in Naples [2], it was already planned to use data acquired on the move, using sensors on board vehicles, to generate a database useful for architectural monitoring (fig. 3). The installation of Optech's Lynx Mobile Mapper on the top of a car made it possible to acquire parts of the city using a combination of four modules: a laser sensor, a GPS satellite system, an IMU Inertial Measurement Unit and a DMI Distance Measurement Instrument, effectively defining a prototype form of what is being theorized and experimented with much more recently with solid-state LiDAR in the automotive field [Cappellini and Campi 2011].

The need, already felt, to speed up the data collection phase by means of movement was subsequently realized in a more concrete manner with the development, and consequent commercialization, of ad hoc designed solutions, thanks to the contextual codification of SLAM algorithms. One of the first instrumental possibilities placed on the market was GeoSLAM's Zeb1, tested by the Urban/Eco research group on the study conducted on the Grotta di Seiano in 2016 [3] (fig. 4). At the time, the potential of dynamic acquisition was immediately appreciated in its positive aspects, especially in terms of reducing operation times when conducted on particularly extended architectures; however, the technology was in the development phase, so the feedback from the point of view of metric accuracy was still not

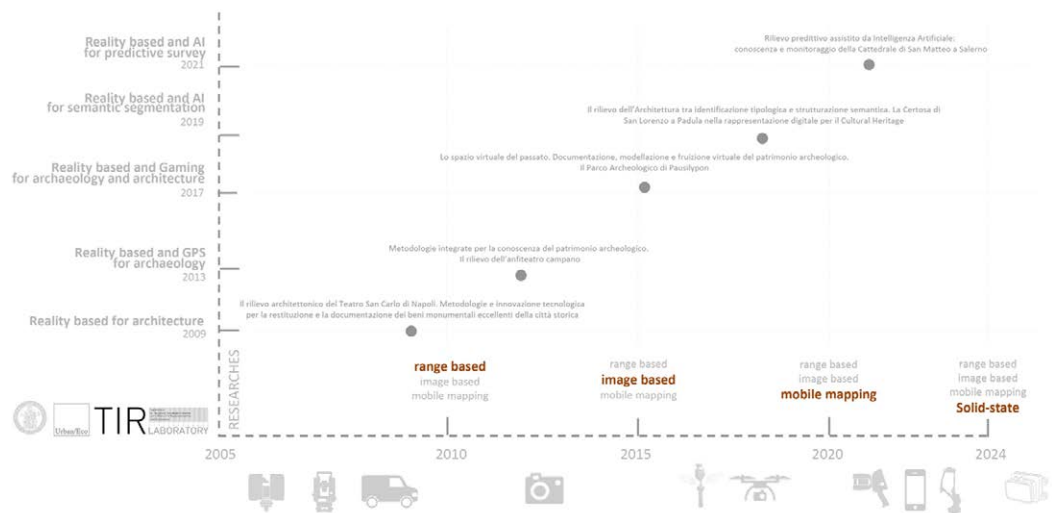


Fig. 2. Summary of the main tests carried out by the research team and indication of the main technology. Elaboration by the authors.

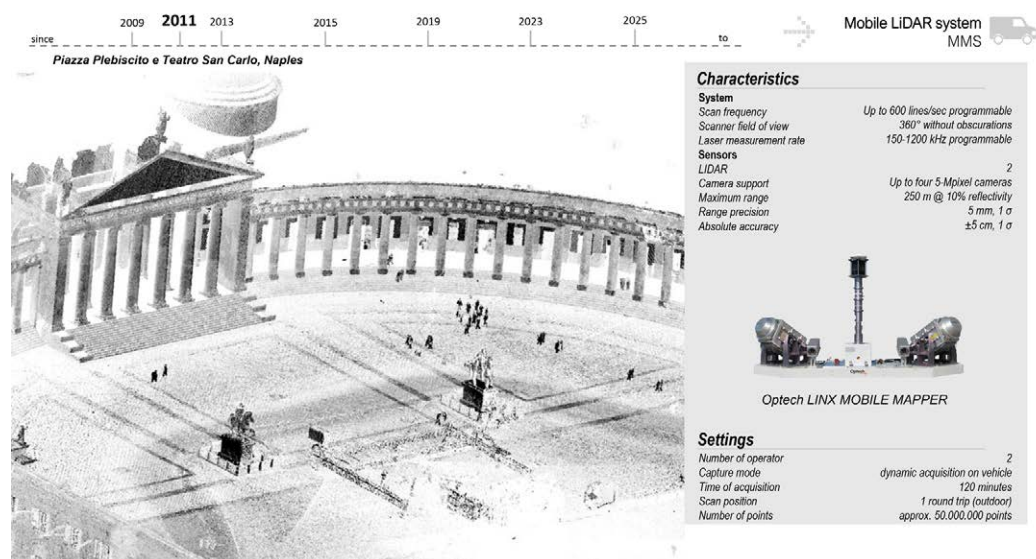


Fig. 3. Summary of the study on Piazza del Plebiscito in Naples. Elaboration by the authors.

fully satisfactory [Farella et al. 2016]. For this reason, the research continued the following year with the application of another instrumentation, Trimble's TIMMS coordinated by Prof. di Luggo together with Prof. Campi [4], capable of digitizing an artefact through movement thanks to the installation of a static laser scanner mounted on a trolley and assisted by an IMU (fig. 5). The study, carried out on the case of the Monte Sant'Angelo complex in Naples, allowed to perform several tests on some different and possible acquisition conditions, comparing the results obtained in terms of cleaning and topological correctness of the point cloud [Campi et al. 2018].

The results of the evaluations were undoubtedly promising, although the solutions were still young and, above all, not easily accessible in economic terms. From the point of view, then, of the accuracy of the metric data, the gap with static solutions persisted, which is why subsequent studies were developed concentrating on the use of TLS sensors, both phase-modulated and T.O.F. Experiences such as that of the PRIN CHROME [5], was in fact conducted together with the IT research unit by setting the digitization of the case studies, the three Carthusian monasteries in Campania, on the integration of reality-based sensors (fig. 6) and adopting as metric reference the discrete model acquired with a FARO Focus3D

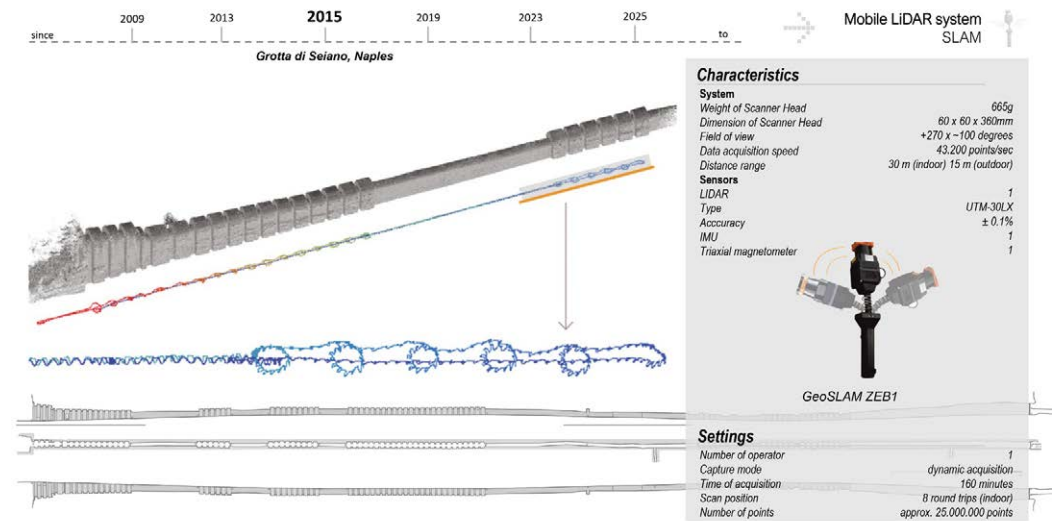


Fig. 4. Summary of the experiment conducted on the Grotta di Seiano, Naples. Elaboration by the authors.



Fig. 5. Summary of the research on the university complex of Monte Sant'Angelo, Naples. Elaboration by M. Siconolfi and S. Monaco.

S120 [Campi 2017; Campi et al. 2018]. Similarly, comparative studies on the combination of data acquired with different sensors have been produced on the case study of Palazzo Donn'Anna in Naples, research conducted with Prof. A. di Luggo in 2019 [6], choosing as reference dataset the one recorded with a time-of-flight, the Riegl VZ400i (fig. 7) [di Luggo et al. 2019].

Towards the end of the first two decades of the 21st century, however, the progress made in perfecting both simultaneous localization and mapping algorithms and the creation of increasingly high-performance LiDARs significantly changed the operational scenarios. So, in 2020, the opportunity matured for the group to experiment with a technological solution that, to date, confirms itself as one of the best performing in the panorama of dynamic surveying, the VLX by NavVis. The digitization of the Cathedral of San Matteo in Salerno [7] has, in fact, provided the possibility of evaluating the point cloud obtained thanks to two lidar sensors mounted on an exoskeleton, worn by the operator in movement (fig. 8) [Campi et al. 2022]. At the same time, the market is increasingly demonstrating the commercialization of new dynamic surveying instruments, characterized by a significantly advantageous quality/price ratio. With the aim of verifying this trend, in the last year an experiment was started on the

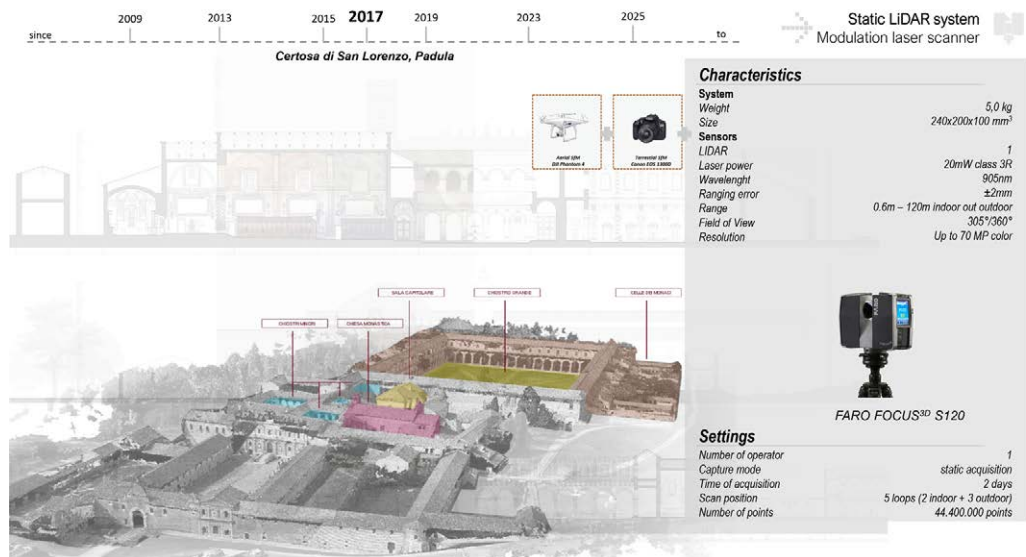


Fig. 6. Summary of the study on the Charterhouse of San Lorenzo in Padula. Elaboration by the author V. Cera.

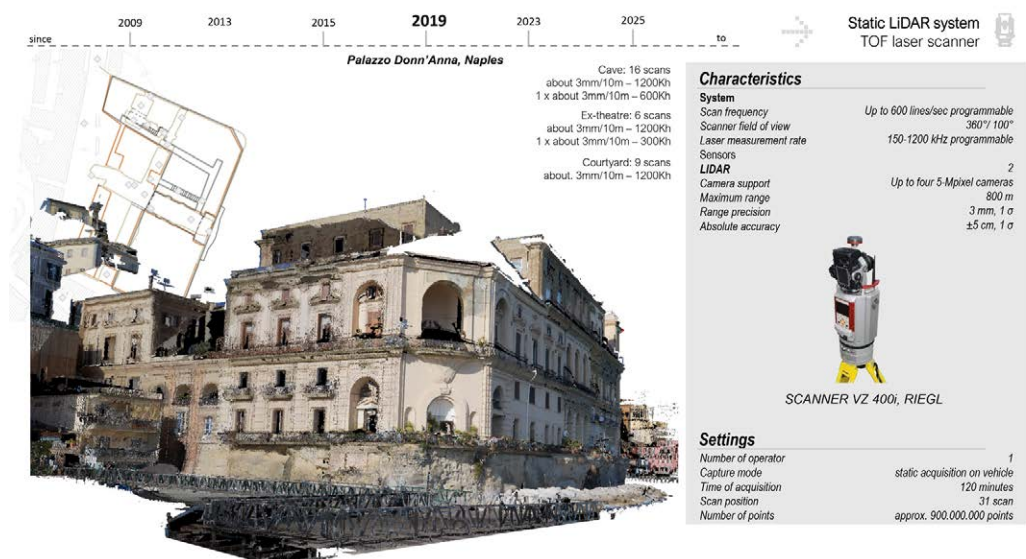


Fig. 7. Summary of the experiment carried out on Palazzo Donn'Anna. Elaboration by F. Pisano, S. Scandurra and M. Pulcrano.



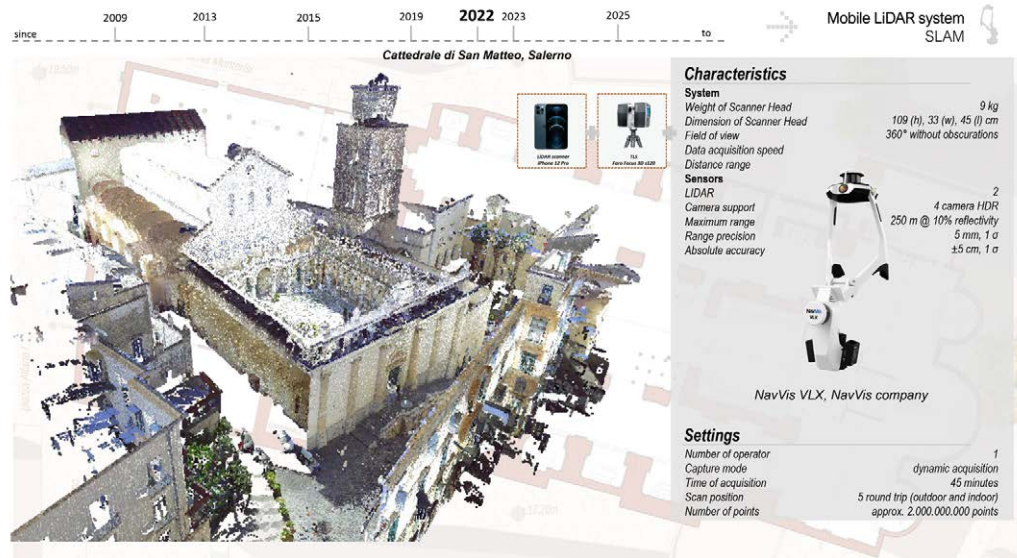


Fig. 8. Summary of the research on the Cathedral of San Matteo, Salerno. Elaboration by the author M. Falcone.



Fig. 9. Summary of the ongoing experimentation on the Sant'Anna dei Lombardi monumental complex. Elaboration by the authors with F. Battimelli.

monumental complex of Sant'Anna dei Lombardi in Naples, within the framework of the Italian CIPA-HD Scientific Committee of ICOMOS [8]. Specifically, the research is dealing with the definition of an operational digitization protocol based on instrumental comparison from which to codify guidelines. To date, the Sant'Anna complex has been discretized using both phase modulation sensors with fixed stations and a dynamic LiDAR of the Zeb Horizon type from GeoSLAM (fig. 9). The analysis of the data is ongoing, but the first results undoubtedly testify to the maturity achieved in the development of mobile solutions, which are now capable of guaranteeing greater refinement in the metric data, with an increasingly affordable instrumentation cost.

### Solid-state sensors. New research frontiers for urban monitoring

In recent years, the spread of LiDAR sensors has revolutionized 3D data acquisition. Since the 1990s, this technology has evolved considerably, and its versatile potential has allowed it to be developed ever more rapidly in various fields of application. Recently, one of the most important achievements in laser scanning technology are solid-state systems, which have the

ability to obtain morpho-metric information of the surveyed scene from motorized vehicles. On the basis of these premises, in the last year the research group has initiated a new focus of investigation that sees its first developments in the DUPIN Deductive Unit in Predictive Intelligence Network project, the aim of which is to highlight how it is possible to develop innovative solutions that provide information related to the urban environment. In this perspective, the research - conceived and coordinated by researchers from the Department of Architecture (DIARC) and the Department of Industrial Engineering (DII) of the University of Naples 'Federico II' [9] - aims to establish a monitoring system for built and urban heritage based on heterogeneous sensors derived from vehicular traffic (fig. 10). In particular, it is proposed to outline an innovative investigation methodology through the design of a digital information system that integrates optical systems, such as solid-state sen-

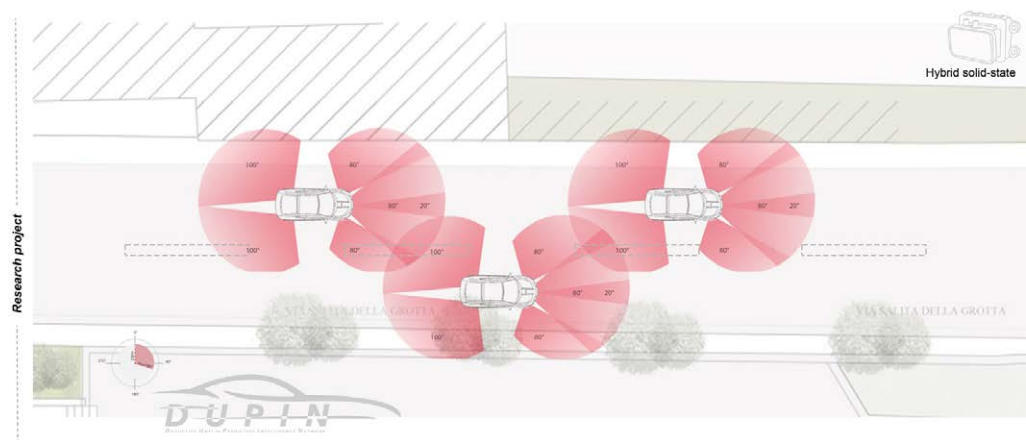


Fig. 10. Summary of the project idea 'DUPIN Deductive Unit in Predictive Intelligence Network'. Elaboration by the authors.

sors, environmental sensors capable of collecting spatial data and information related to the built environment, in a continuous and widespread manner, and Artificial Intelligence techniques to identify structural damage, surface degradation and environmental variations that may affect the conservation of urban heritage. In this field of investigation, it is crucial to note that the strategy used is rooted in the field of monitoring architectural heritage, exploiting commonly used techniques and methodologies aided by detection through convolutional neural networks, which are widely and successfully applied in sectors other than the one of interest in this research, from the biomedical field to that of autonomous driving. In fact, modern vehicles have such enormous advantages and potential as to be considered true 'data databases' capable of gathering information not only for the automotive field but also for monitoring the architectural and urban heritage that surrounds them.

In order to obtain preliminary feedback on the validity of the procedure, the research team, in accordance with its interdisciplinary competences, has already initiated collaborations as well as experimental campaigns in the laboratory, the results of which have allowed them to detail the technologies to be deployed and, at the same time, to implement investigation protocols. In this perspective, the experimentation phase focused on the monitoring of a 3D set with 1:100 scale architectural models through the analysis of LiDAR Flash solid-state sensors on iPhone 12 Pro and 12 Pro Max, mounted with 3D printing support, on a radio-controlled vehicle. Subsequently, the collected data became the starting database for developing a detection algorithm, based on the use of artificial intelligence and machine learning [Falcone and Dell'Annunziata Napolitano 2023] (fig. 11). The results obtained for this case study were extremely encouraging, showing the goodness of the approach proposed in the new line of research.

Therefore, in this perspective, the solutions and tools proposed for the 'state of health' of the urban built environment from vehicular traffic will make it possible to start the process of real-time monitoring of urban contexts while supporting the processes related to preventive (diagnostic) and regeneration activities.

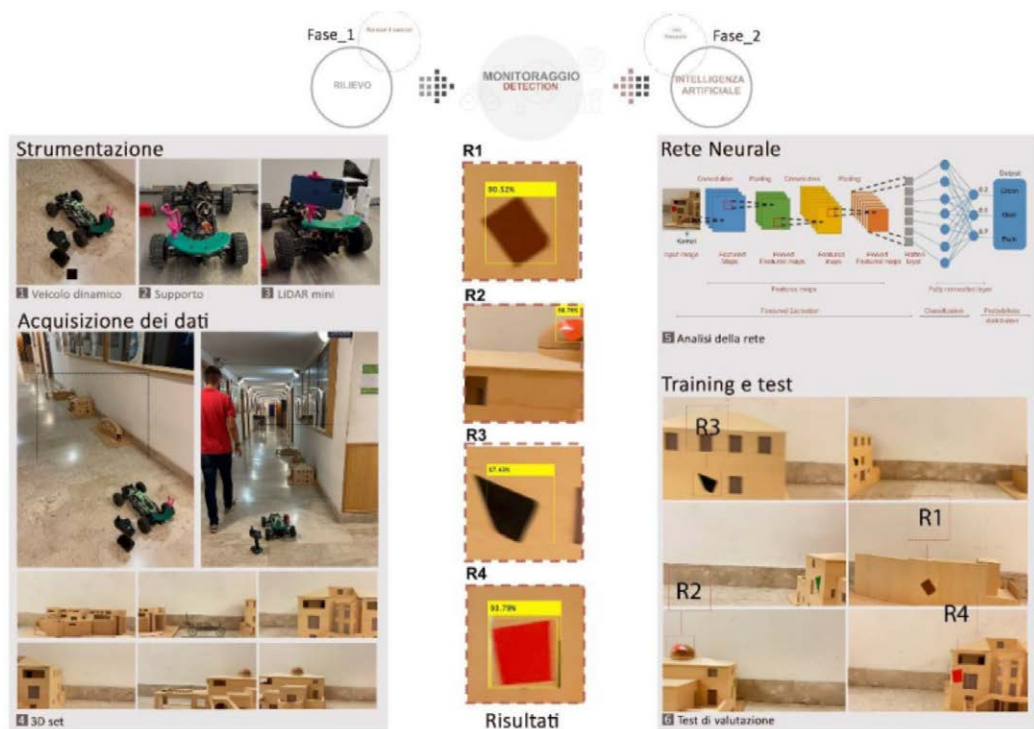


Fig. 11. Summary of the experimentation for the 'DUPIN Deductive Unit in Predictive Intelligence Network' project. Elaboration by the author M. Falcone with G. Napolitano dell'Annunziata.

## Conclusions

Technological advancement today allows for the production of high-performance instrumental systems that, although not originally designed for Architecture, show unprecedented potential applications that open up research in the experimentation of such systems in other disciplinary sectors as well. Therefore, these new lines of research point to new challenges and new operational scenarios in which it becomes necessary to make critical considerations based on the technologies to be deployed. Particular attention will have to be paid to the in-depth analysis of measurement both in qualitative terms, starting with the potentially dangerous redundancy of the data (the unmeasurement), as well as in quantitative terms on the accuracy and precision of the measurement itself, which now becomes not only the prerogative of Architecture but also of new fields of application for experimentation.

## Acknowledgements

The authors, all of whom were variously involved in the research presented, would like to thank the additional people involved. In particular, for the research with the Lynx Mobile Mapper we thank the company Optech for the instrumentation and support; for the study on the Grotta di Seiano we thank the Optical Metrology 3DOM unit of the Fondazione Bruno Kessler FBK in Trento in the persons of Eng. F. Remondino with E. Nocerino, F. Menna and the company Mesa srl; for the experimentation on the Monte Sant'Angelo complex, we would like to thank the company Trimble in the persons of D. Marcontonio and M. Rubidio as well as Prof. A. di Luggo, S. Monaco, M. Siconolfi, D. Palomba; for the digitisation within the framework of the CHROME research project, we would like to thank researchers L.A. Garcia and D. Iovane; for the research on Palazzo Donn'Anna we thank prof. A. di Luggo, F. Pisano, L. Repola, S. Scandurra, M. Pulcrano, D. Palomba; for the research on the Cathedral of San Matteo we thank the company 3DScan in the person of S. Sabbatini for the instrumentation and support; for the experimentation on the monumental complex of Sant'Anna dei Lombardi we thank the company GeoSLAM in the person of A. Cabrucci with F. Battimelli and the Cooperativa Parteneapolis in the person of A. Giglio.

## Notes

[1] Although this contribution is the result of a shared work V. Cera is author of paragraph 1, M. Falcone is author of paragraph 2, introduction and conclusions are by all authors.



- [2] The research was carried out as part of the PhD of arch. V. Cappellini with the supervision of Prof. M. Campi.
- [3] The research was carried out as part of the PhD of arch. E.M. Farella with the supervision of Prof. M. Campi and Ing. F. Remondino.
- [4] The study was carried out as part of a wider research on the university complex conducted by the Department of Architecture of the University of Naples Federico II.
- [5] 'CHROME Cultural Heritage Resources Orienting Multimodal Experiences' is a Research Project of National Interest (PRIN), funded by the Ministry of Education, University and Research from 2017 to 2020. The digitisation activities are part of the PhD of arch. V. Cera with the supervision of Prof. M. Campi, Prof. F. Cutugno, Prof. J.I. San Jose Alonso.
- [6] The study was carried out from the master's degree in architecture by arch. F. Pisano at the Department of Architecture of the University of Naples Federico II.
- [7] The research was carried out as part of the PhD of arch. M. Falcone with the supervision of Prof. M. Campi, Prof. S. Di Martino, Eng. F. Farroni and Arch. S. Sabbatini.
- [8] The research is coordinated by Prof. M. Campi, Dr. A. Cabrucci and Prof. R. A. Genovese.
- [9] The research is coordinated by prof. M. Campi and engineers A. Genovese and F. Farroni with V. Cera, M. Falcone and G. Napoletano Dell'Annunziata.

## References

- Bocca A., Baek D. (2019). Automated Driving Systems: Key Advantages, Limitations and Risks. In *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. Torino, 2-4 luglio 2019, pp. 1-6.
- Campi M., di Luggo A., Monaco S., Siconolfi M., Palomba D. (2018). Indoor and Outdoor Mobile Mapping Systems for architectural surveys. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, pp. 201-208.
- Campi M. (2017). La Certosa di San Martino di Napoli quale scrigno di saperi architettonici ed esemplificazione monumentale per una nuova evoluzione della ricerca. In AA. VV. (a cura di). *Territori e Frontiere della Rappresentazione: Atti del 39° convegno internazionale dei Docenti delle discipline della Rappresentazione*. Napoli, 14-16 settembre 2017. Roma: Gangemi Editore, pp. 1074-1087.
- Campi M., Cera V., Iovane D., Garcia, L.A. (2018). Metodologie integrate e tecniche innovative di rilievo per la conservazione delle Certose in Campania. In R.A. Genovese (a cura di). *Patrimonio e città storiche come poli di integrazione sociale e culturale, sostenibilità e tecnologie innovative*. Napoli: Giannini Editore, pp. 401-426.
- Campi M., Falcone M., Sabbatini S. (2022). Towards continuous monitoring of Architecture. Terrestrial Laser Scanning and Mobile Mapping System for the diagnostic phases of the Cultural Heritage. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVI, pp. 121-127.
- Cappellini V., Campi M. (2011). 3D survey of the San Carlo Theatre in Naples. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-5/W16, pp. 91-97.
- di Luggo A., Campi M., Repola L., Cera V., Scandurra S., Pulcrano M., Falcone M. (2019). Evaluation of historical heritage documentation: Reality based survey and derivative models. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W17, pp. 115-122.
- Farella E., Menna F., Nocerino E., Morabito D., Remondino F., Campi M. (2016). Knowledge and valorization of historical sites through 3D documentation and modeling. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B5, pp. 255-262.
- Falcone M., Napoletano Dell'Annunziata G., (2023). A combined use of Camera Sensor and AI for Rapid Mapping Monitoring for Architecture: an Applicative Case Study. In *Nexus Network Journal*, vol. 25 (suppl. 1), pp. 423-429.
- Nam, D. V., & Gon-Woo, K. (2021). Solid-State LiDAR based-SLAM: A Concise Review and Application. In *IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing*, pp. 302-305.

## Authors

Massimiliano Campi, Università degli Studi di Napoli Federico II, campi@unina.it  
 Valeria Cera, Università degli Studi di Napoli Federico II, valeria.cera@unina.it  
 Marika Falcone, Università degli Studi di Napoli Federico II, marika.falcone@unina.it

To cite this chapter: Massimiliano Campi, Valeria Cera, Marika Falcone (2024). Scenari innovativi nel rilievo e monitoraggio architettonico con LiDAR a stato solido e sistemi ADC/Innovative scenarios in architectural survey and monitoring using Solid State LiDAR and ADC systems. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 195-212.