

Quantità e qualità nell'uso della tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura

Leonardo Paris
Maria Laura Rossi

Abstract

Tra i nuovi strumenti di acquisizione digitale della forma si sta sempre più diffondendo nel rilievo architettonico l'utilizzo della tecnologia SLAM, cioè di uno scanner mobile in grado di registrare in *real time* il movimento di un sensore lungo una traiettoria e di mappare le principali caratteristiche geometriche dell'ambiente in cui il sensore si sta muovendo. Gli strumenti SLAM, pur utilizzando una modalità Lidar già notevolmente diffusa, non sono una semplice evoluzione del TLS ma rappresentano un vero e proprio salto tecnologico in quanto al sensore laser è associata anche una piattaforma inerziale IMU. I dati ricavati dai due sensori vengono poi ottimizzati attraverso un'analisi *real time* delle geometrie rilevate.

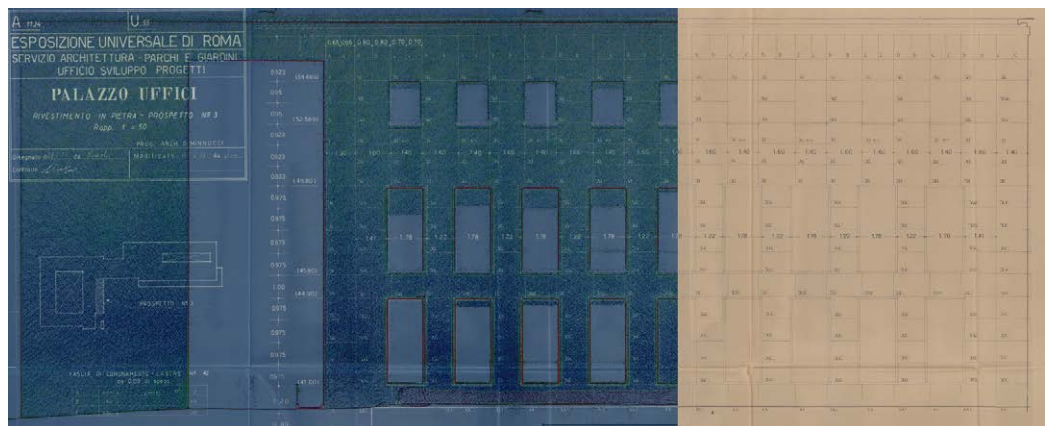
Le considerazioni riportate in questo contributo derivano da alcune sperimentazioni di rilievo del Palazzo degli Uffici all'EUR di Roma in cui si è voluto testare l'affidabilità e la precisione dei dati SLAM rispetto a TLS e/o IBM anche al fine di ottenere una informazione metrica integrata omogenea. Un ulteriore livello di sperimentazione ha riguardato, nella fase di post processing, l'ottimizzazione della qualità del dato grezzo e delle successive operazioni di *merging* tra le diverse nuvole di punti.

In questo scenario diventa ancora più rilevante un'accurata progettazione della fase di acquisizione digitale al fine di ottimizzare il rapporto tra quantità dell'informazione metrica e qualità dei modelli di restituzione.

Parole chiave

SLAM, Rilievo digitale integrato, Edifici storici, 3D shape acquisition, nuvola di punti.

Palazzo degli Uffici, EUR, Roma.
Progetto dell'ingegnere e architetto italiano Gaetano Minnucci. Elaborato grafico relativo alle variazioni dimensionali (anche millimetriche) delle lastre in travertino di rivestimento delle facciate. Parziale sovrapposizione grafica con il dato digitale da rilievo integrato che esalta la corrispondenza tra opera progettata e realizzata.



Acquisizioni metriche e *salti* tecnologici

L'evoluzione della tecnologia digitale applicata al rilievo architettonico [1] ha avuto delle conseguenze. Una tra queste, l'aver progressivamente accentuato la separazione tra la fase di acquisizione e quella di restituzione. Lo scopo principale della prima fase è l'informazione metrica che oggi, quasi sempre, si concretizza in una nuvola di punti; a seconda poi delle diverse metodologie e tecniche utilizzate, è possibile associare altre informazioni, come per esempio il colore, la riflettanza, la risposta termica ecc. L'informazione metrica è il risultato di una prima elaborazione di più dati ottenuti dallo strumento. Le coordinate cartesiane di una nuvola di punti sono il prodotto di una elaborazione che si basa su una serie di dati ricavati dallo strumento.

La capacità di acquisizione è cresciuta in modo esponenziale negli ultimi decenni anche se nell'evoluzione della tecnologia digitale è sempre opportuno fare una distinzione tra sviluppi che aumentano la prestazione (uno scanner laser di oggi è notevolmente più rapido ed accurato di uno di venti anni fa) e innovazione che determina un *salto* tecnologico. In quest'ultimo caso si verifica, spesso, un conseguente aggiornamento metodologico disciplinare. Lo scanner laser terrestre (TLS) si basa su una modalità di acquisizione già in uso con la stazione totale (quello delle coordinate polari associate ad una distanza acquisita con il laser) ma è indubbio che questo strumento abbia rappresentato un salto nell'evoluzione degli strumenti della *3D shape acquisition*. Salto che non è solo di rapidità e di numero di punti per secondo ma che è sostanziale sia per accuratezza che per riferimento con l'oggetto reale [2].

Si è così consolidato nel tempo quel diverso rapporto nel binomio acquisizione/restituzione di cui si è detto prima.

Anche nella fotogrammetria (IBM - Image-Based Modeling) è accaduto qualcosa di simile nel passaggio da quella numerica, in uso negli anni '80 e '90 del secolo scorso, a quella digitale, oggi di uso comune. Con un'aggravante nel momento in cui la nuvola di punti densa non strutturata viene "automaticamente" convertita in informazione geometrica (*mesh*) molto spesso di scarso valore ai fini della elaborazione di efficaci modelli di rappresentazione. In realtà l'elaborazione della *mesh* non avviene in modo automatico ma applicando un algoritmo con una sostanziale perdita di controllo cognitivo dell'oggetto rilevato.

Sia nell'uso dello scanner laser terrestre che nella fotogrammetria è apparso quindi evidente ed urgente la necessità di definire criteri metodologici in grado di valutare il giusto rapporto tra quantità e qualità dell'informazione metrica nella fase di acquisizione con conseguenti risvolti nella fase di restituzione. Le esperienze da noi maturate in decenni di rilievi digitali hanno evidenziato gli indubbi vantaggi dell'evoluzione tecnologica digitale con, di contro, alcune criticità. L'eccessiva quantità di informazioni metriche, per esempio, può condizionare negativamente la fase di restituzione e non sempre è sinonimo di qualità.

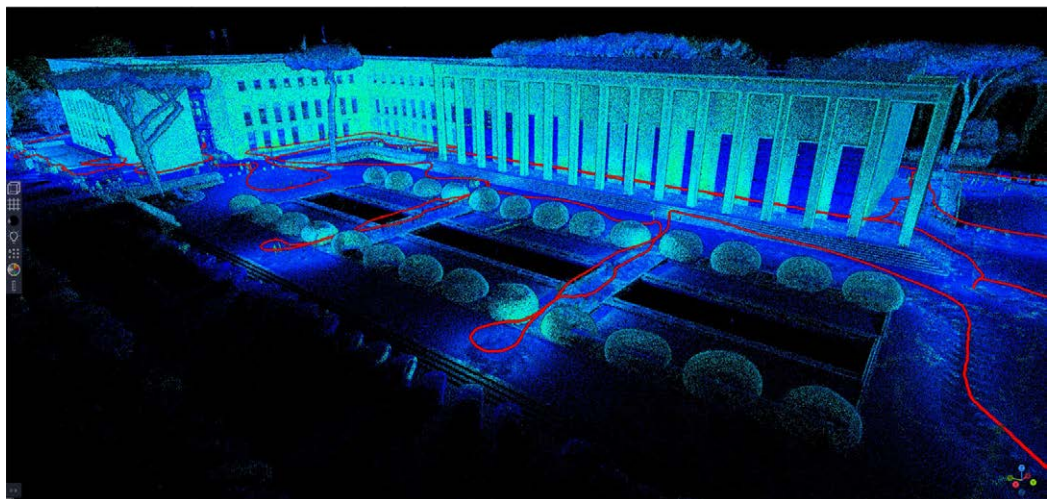


Fig. 1. Visualizzazione della traiettoria di acquisizione con tecnologia SLAM all'esterno del Palazzo degli Uffici, Roma. Elaborazione degli autori.

Rispetto a queste premesse è interessante valutare un altro più recente salto tecnologico rappresentato dalla tecnologia di acquisizione SLAM. L'acronimo (*Simultaneous Localization and Mapping*) definisce quella tecnologia in grado di registrare in *real time* il movimento di un sensore lungo una traiettoria e di mappare le principali caratteristiche geometriche dell'ambiente in cui il sensore si sta muovendo (fig. 1).

È una tecnologia nata alla fine del secolo scorso nell'ambito dell'ingegneria robotica [Aulinas et al. 2008] e che, di recente - anche grazie ai progressi nella velocità di elaborazione ed alla disponibilità di sensori a basso costo - si sta sempre più diffondendo anche nel rilievo architettonico. Esistono ad oggi due principali categorie SLAM, quella visiva e quella Lidar [Arshad et al. 2021]. La prima (vSLAM) utilizza immagini acquisite da fotocamere e quindi sfrutta le procedure di acquisizione ed elaborazione in uso nella fotogrammetria, la seconda utilizza principalmente un sensore laser e rispetto alla prima è in grado di fornire informazioni metriche più precise.

Il salto più evidente rispetto alle due metodologie maggiormente utilizzate negli ultimi decenni (TLS e IMB) è nel cambiamento del "centro di proiezione" che nello SLAM si trasforma in una traiettoria, cioè da punto fisso a linea.

La tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura

Nella maggior parte delle applicazioni di rilievo architettonico, nella fase di acquisizione è ormai consolidato un approccio di tipo integrato con l'utilizzo contemporaneo delle diverse metodologie di *3d shape acquisition*. In questo modo è così possibile ottimizzare i tempi, i costi e la qualità del rilievo adattando le diverse metodologie alle caratteristiche dell'oggetto rilevato [Bianchini et al. 2019].

Diventa quindi sempre più indispensabile progettare accuratamente la fase di acquisizione. Per quanto riguarda il TLS e l'IMB c'è ormai una consolidata letteratura in merito. Per le acquisizioni SLAM invece si è ancora in una fase sperimentale anche in relazione alla continua evoluzione degli strumenti [Calvano et al. 2023].



Fig. 2. GEOSLAM Zeb Horizon: lo strumento opera in modalità dinamica e continua con il movimento dell'operatore, il quale ha la possibilità di vedere in *real time* attraverso uno smartphone il costruirsi della nuvola di punti in relazione alla traiettoria eseguita. Elaborazione degli autori.

La prima considerazione da fare riguarda la qualità della nuvola di punti ottenuta tramite SLAM che è condizionata sia dalla tecnologia strumentale sia dalla modalità di utilizzo. La maggior parte dei dispositivi in commercio utilizza un sensore rotante LiDAR, dotato cioè di lettura laser delle distanze associato ad una piattaforma inerziale (IMU). L'informazione metrica però non è calcolata semplicemente come combinazione dei due sensori ma anche come analisi *real time* delle geometrie rilevate. La nuvola di punti dell'ambiente rilevato è pertanto ottenuta attraverso un processo iterativo in grado di migliorare la stima delle coordinate dei punti rilevati. Più iterazioni - che necessitano però di una maggiore capacità di calcolo - aumentano la qualità del risultato. L'acquisizione SLAM produce una quantità di *noise* maggiore rispetto, per esempio, al TLS anche se molti software dispongono di algoritmi in grado di eliminare in fase di post processing l'eccessiva dispersione dei punti restituiti dallo strumento.



Fig. 3. Georeferenziazione della nuvola IBM (in basso) a partire da alcuni punti a coordinate note - locali e assolute - interrogati sulla nuvola TLS. Elaborazione degli autori.

La qualità del risultato, che è sempre condizionata sia dallo strumento che dal suo uso, include in questo caso anche una componente dinamica definita dalla traiettoria e dalla velocità – e quindi dal tempo di acquisizione. Le singole nuvole di punti, che nel TLS sono riferite a stazioni fisse puntiformi, vengono in questo caso ottenute da blocchi di percorsi decisi dall'operatore ad una determinata velocità di acquisizione. Tutte le valutazioni fatte in modalità TLS e IBM sulle cosiddette zone d'ombra vengono per la maggior parte risolte in relazione al fatto che la ripresa non è puntiforme ma lineare. L'individuazione dei blocchi lineari viene influenzata inevitabilmente anche dalle caratteristiche dello strumento utilizzato. Le considerazioni riportate in questo contributo fanno riferimento ad alcune sperimentazioni nelle quali si è voluto testare l'affidabilità e la precisione dei dati acquisiti tramite tecnologia SLAM rispetto a TLS e/o IBM anche al fine di ottenere una informazione metrica integrata omogenea. Un ulteriore livello di sperimentazione è stato, nella fase di post processing, quello legato all'ottimizzazione della qualità del dato grezzo e delle successive operazioni di *merging* tra le diverse nuvole di punti all'interno di uno stesso sistema di riferimento.

Un caso studio: il palazzo degli Uffici all'Eur

Un caso applicativo di sperimentazione di queste nuove tecnologie digitali di acquisizione massiva, e delle conseguenti tecniche digitali di integrazione di dati, è stato il Palazzo degli Uffici [3] progettato dall'Ing. Gaetano Minnucci nel 1937 nel quartiere romano dell'EUR. Fu la prima opera permanente ad essere completata nel vasto progetto dell'Esposizione Universale di Roma, considerato l'edificio "pilota" per tutte le altre realizzazioni dell'E42.

Le operazioni di rilievo dell'edificio hanno previsto l'utilizzo delle tre strumentazioni: TLS FARO FOCUS X 130, IBM con drone DJI Mavic e GEOSLAM Zeb Horizon (fig.2). Lo strumento SLAM rientra tra quelli di fascia medio-alta e consente di acquisire punti di controllo

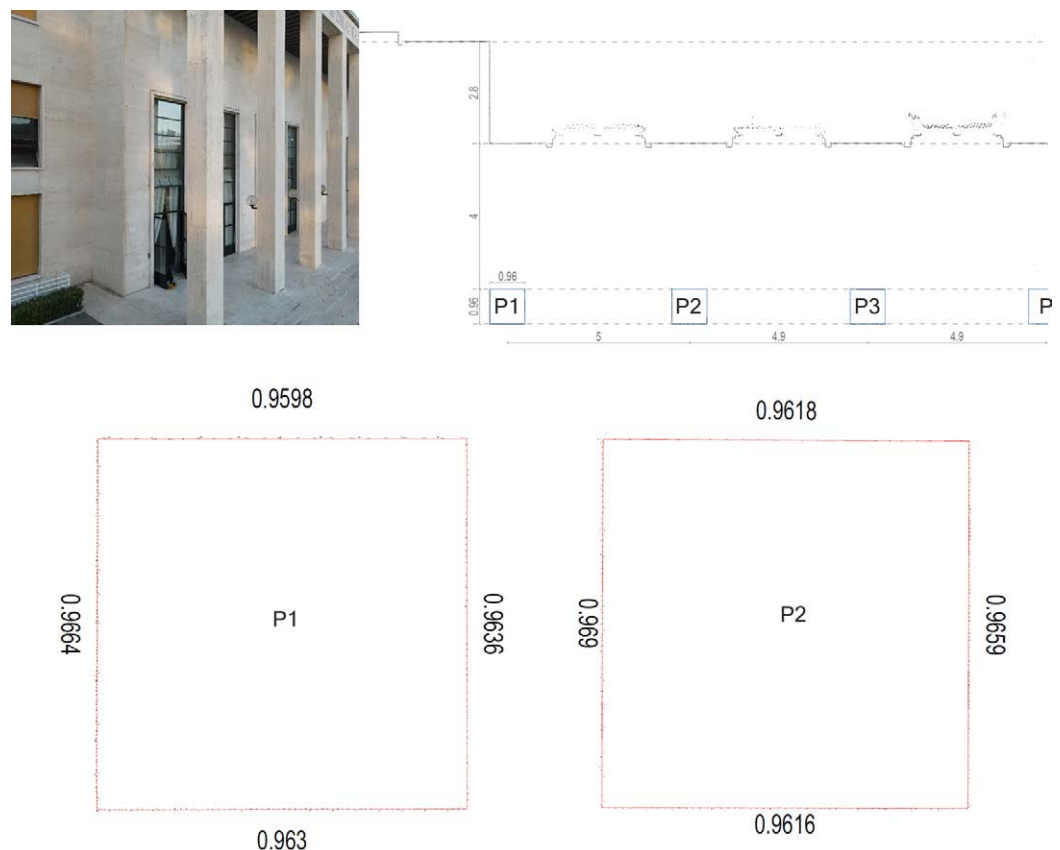


Fig. 4. L'interpolazione dei punti rilevati lungo una superficie è tanto più probabile e accurata quanto più il dato di rilievo è denso e presenta un basso rumore. Tali tracciati poligonal vanno poi criticamente rivisti in termini di misura, associandovi fattori di forma, geometria, proporzione e progetto. Elaborazione degli autori.

durante il tragitto cui associare un sistema di coordinate note georeferenziate, in grado di ottimizzare a sua volta l'algoritmo di elaborazione della nuvola di punti. Un ulteriore livello di ottimizzazione è dato da acquisizioni fatte con traiettorie chiuse in cui il primo e l'ultimo punto di controllo coincidono.

Sono stati eseguiti 3 circuiti, uno esterno al palazzo, uno interno, e uno in copertura. Le nuvole di punti così ottenute sono state registrate su di uno stesso sistema di riferimento e messe in correlazione con le altre nuvole di punti TLS e IBM.

La nuvola ricavata da acquisizioni fotogrammetriche è stata elaborata e scalata attraverso l'inserimento di *marker* a coordinate note selezionati interrogando la nuvola da scanner georeferenziate così da garantire una sovrapposizione di dimensione e di posizione tra le due. La costruzione della nuvola sparsa, automaticamente generata dall'allineamento delle immagini, e le operazioni di scalatura e georeferenziazione hanno generato un errore inferiore a 4 cm.

Per evitare problemi di lettura delle coordinate georeferenziate, solitamente lontani chilometri dall'origine dei sistemi di riferimento dei software di gestione di nuvole di punti, si è adottata una interrogazione in un sistema di riferimento locale, applicando poi alla nuvola fotogrammetrica una trasformazione rigida nello spazio coerente con il sistema globale (fig.3). Considerando l'errore centimetrico della nuvola fotogrammetrica e un rumore diffuso dettato dalla costruzione automatica di una *point cloud* non strutturata, si è deciso di prendere a riferimento la nuvola da scanner, molto più definita e con un errore millimetrico, per ottimizzare la registrazione delle nuvole da SLAM.

In particolare, estrapolata una *slice* orizzontale di spessore 5 cm, è possibile vedere con estrema precisione il definirsi dei profili sezione dei vari componenti. Ad esempio, prendendo a riferimento i profili del colonnato a sezione quadrata del salone pubblico (fig. 4) è

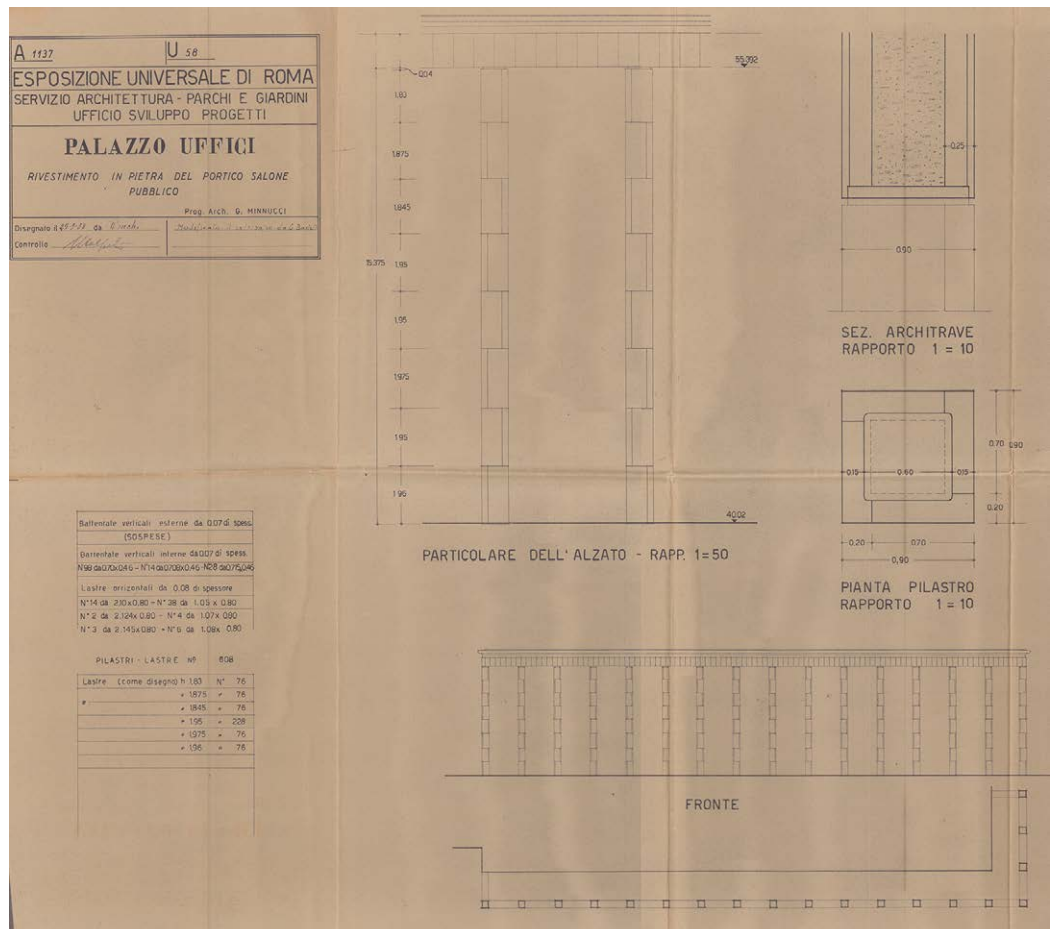


Fig. 5. Elaborato progettuale del fondo Minnucci presente all'Archivio di Stato di Roma. Particolare del rivestimento del colonnato del portico del salone pubblico: finitura compresa, le colonne quadrate risultano di dimensione 90x90cm, diversamente da quanto realizzato (Fondo Minnucci, Archivio di Stato di Roma).

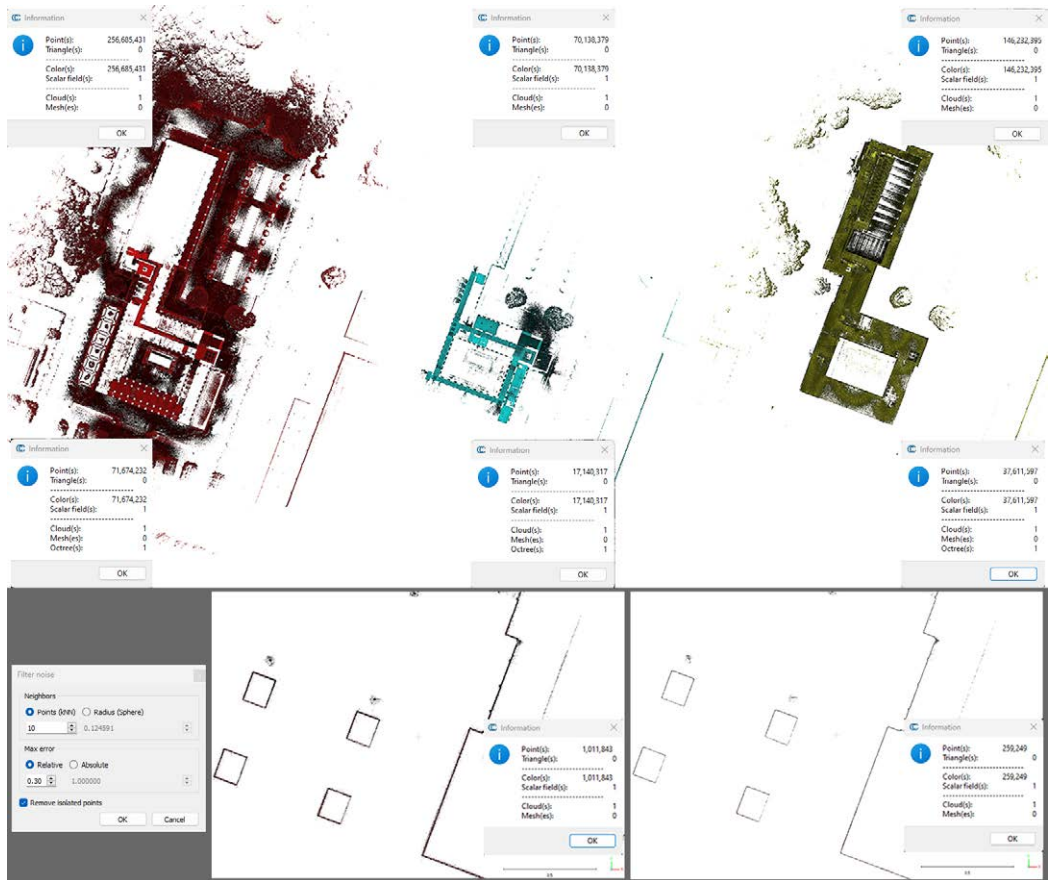


Fig. 6. Applicazione in CloudCompare di un algoritmo di riduzione del rumore e di eliminazione di punti isolati su nuvole SLAM. L'operazione, oltre a rendere più definita la geometria rilevata, riduce sensibilmente la pesantezza di ogni nuvola - da centinaia di milioni di punti a poche decine - rendendo il sistema di calcolo più agile e snello. Elaborazione degli autori.

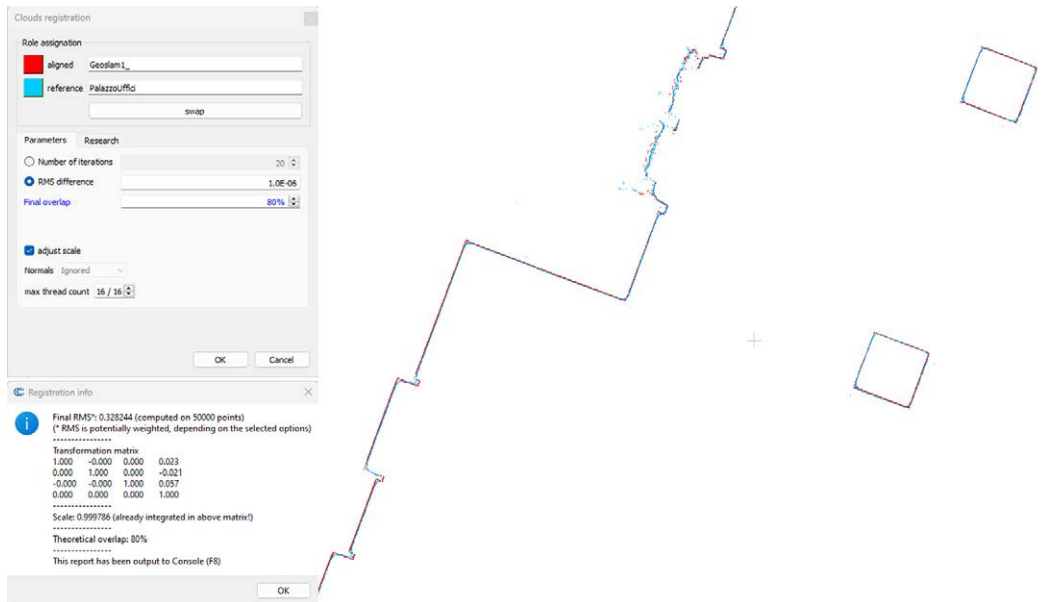


Fig. 7. Applicazione dell'algoritmo di riduzione di distanza ICP tra due nuvole di punti su zone ad alta sovrapposizione. Il processo genera la matrice di trasformazione applicabile alle zone con una percentuale di sovrapposizione più bassa. Elaborazione degli autori.

possibile notare come una l'alta densità della nuvola e un rumore superficiale inferiore ai 4 mm siano in grado di limitare l'incertezza nella interpolazione dei punti in fase di restituzione. L'analisi della nuvola restituisce una sezione di lato 96 cm (+/- 3mm), diverso da quello ipotizzato sulla base della lettura dei documenti di archivio del fondo Minnucci (fig. 5).

Valutata quindi l'affidabilità in termini di precisione della nuvola TLS, presa a riferimento, è stato possibile ottimizzare quantità e qualità delle altre nuvole per ottenere un'unica nuvola di punti che presentasse caratteristiche di omogeneità e di affidabilità dell'informazione. Le nuvole Geoslam sono state preventivamente filtrate per ridurre il *noise* sperimentando in questa fase l'efficacia di alcuni algoritmi e dei relativi settaggi iniziali (fig.6). La riduzione del rumore sulle nuvole ha consentito una più accurata selezione di alcuni punti significativi (spigoli, angoli, etc.) le cui coordinate sono state poi associate al sistema di riferimento globale. La registrazione delle nuvole georeferenziate è stata affinata applicando l'algoritmo ICP [4] che analizza le corrispondenze tra nuvola e nuvola. Per ogni coppia di nuvole sono state isolate solo le porzioni in comune, così da evitare lungaggini di calcolo e possibili errori dovuti all'analisi di zone non in sovrapposizione. Al termine di ogni operazione, la matrice con le componenti di rototraslazione è stata applicata alle nuvole complessive. La procedura è stata reiterata per ogni nuvola Geoslam con riferimento alla nuvola TLS (fig.7). Un altro obiettivo di questa ricerca è stato quello di sperimentare attraverso comparazioni tra dati, i diversi risultati ottenuti validando così la procedura seguita e certificando l'affidabilità della nuvola di punti finale, esito del *merge* delle singole nuvole, attraverso l'esplicitazione delle varie deviazioni. Selezionando a campione alcune zone di sovrapposizione è stato possibile generare una visualizzazione grafico-metrica dello scarto tra una nuvola di riferimento - scanner - e quella allineata - geoslam e/o fotogrammetria (fig.8) [Yang, Medioni 1991]. La nuvola complessiva, ottimizzata dal punto di vista del rumore, della definizione e delle varie sovrapposizioni, è stata posta a base di operazioni critiche di interpretazione della forma e delle dimensioni dei vari componenti architettonici, integrando la dimensione metrica del dato di rilievo con quanto suggerito dagli elaborati grafici di progetto che per buona parte dell'edificio hanno trovato riscontro (fig.9).

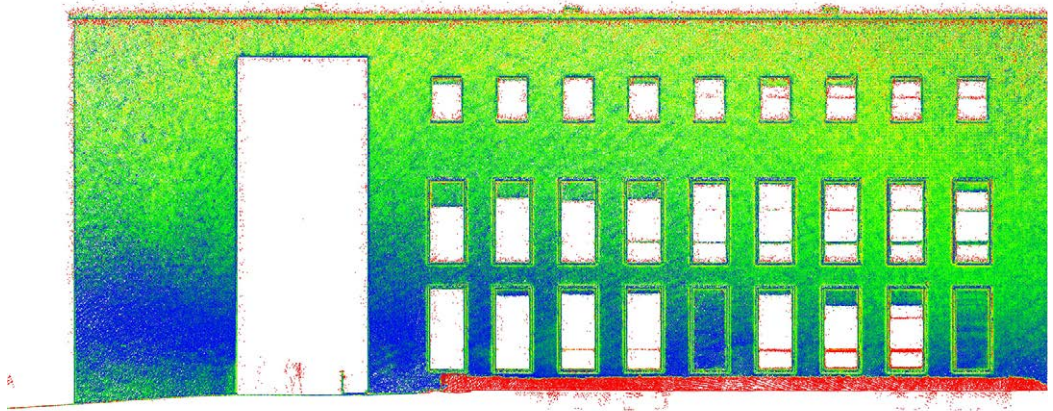
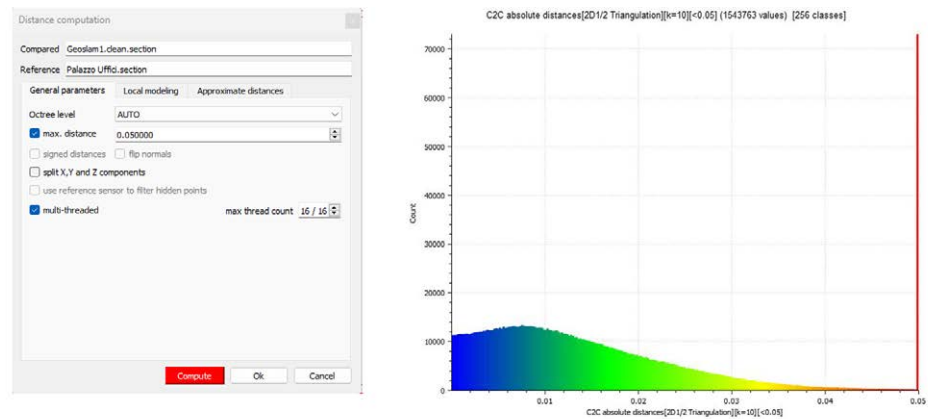


Fig. 8. Analisi della deviazione su una superficie di sovrapposizione tra nuvola TLS e una nuvola da SLAM. Il calcolo, impostato su un valore massimo di 5 cm (superato solo nelle zone di non sovrapposizione, di lacuna nell'una e l'altra nuvola), si attesta inferiore all'1 cm nelle zone basse (4m) più vicine all'origine dello strumento, inferiore ai 3 cm nelle parti alte prossime alla copertura. Elaborazione degli autori.

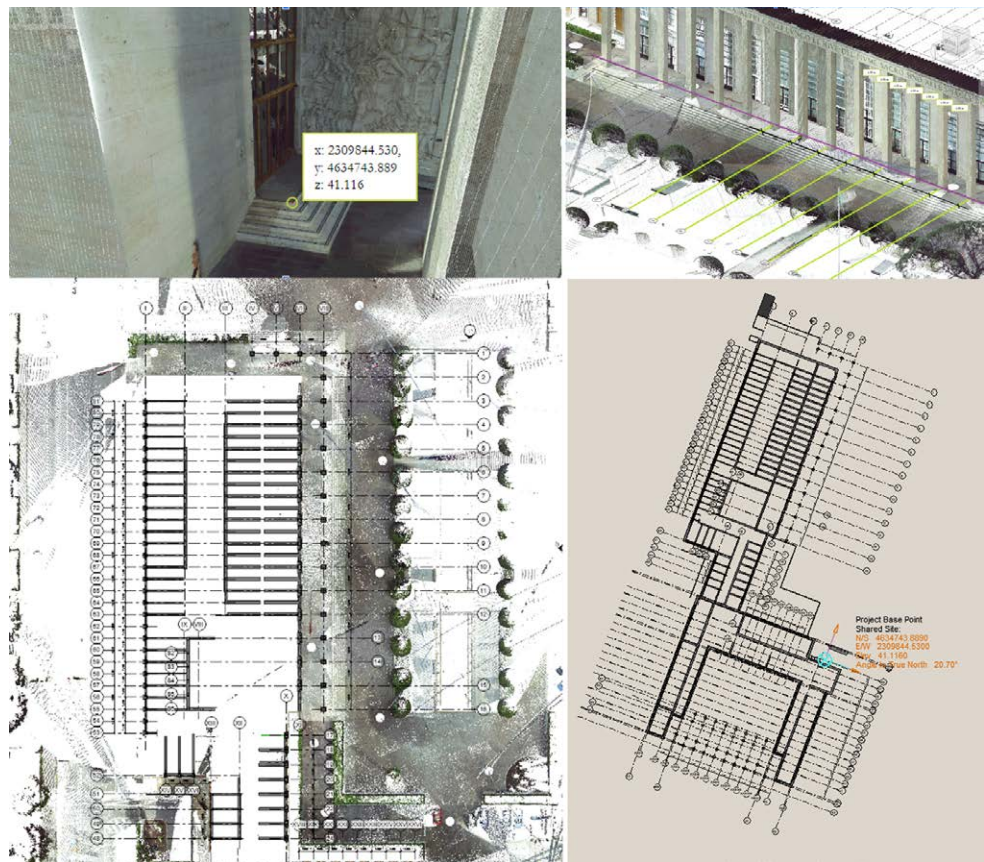


Fig. 9. Impostazione del sistema di riferimento globale all'interno dell'ambiente digitale di costruzione di modelli matematici. Importazione e analisi critica del dato di rilievo: tracciamento di piani di riferimento e griglie strutturali per l'individuazione di allineamenti e passi modulari. Elaborazione degli autori.



Fig. 10. Visualizzazione prospettica del modello digitale continuo: vista esterna del portico del salone del pubblico. Elaborazione degli autori.

Conclusioni

La sperimentazione fatta sul Palazzo degli Uffici dell'Eur ha evidenziato le notevoli potenzialità nell'utilizzo della tecnologia SLAM nel rilievo architettonico. Un edificio di grandi dimensioni e con una articolata distribuzione degli ambienti interni, con la maggior parte dei locali utilizzati per le più diverse esigenze amministrative [5], con il solo utilizzo massivo del

TLS avrebbe comportato tempi dilatati ed una gestione di file di dati di grandi dimensioni. L'informazione metrica ricavata dal Geoslam si è dimostrata efficace, sia per risoluzione che per accuratezza, ai fini dell'elaborazione dei modelli di rappresentazione, tenuto anche conto delle caratteristiche formali dell'edificio rilevato.

La definizione di un progetto nella fase di acquisizione con l'utilizzo integrato di diverse tecniche e metodologie (GPS, TLS, IBM e SLAM) rappresenta un momento fondamentale che non riguarda solo la corretta applicazione di una tecnologia ma anche la definizione del livello qualitativo nell'elaborazione dei modelli di rappresentazione (fig.10).

Note

[1] In particolare ci si riferisce ad una specifica fase del rilievo architettonico, quella di acquisizione metrica, che è solo una parte di quell'ampio processo conoscitivo che contraddistingue la disciplina scientifica del rilievo.

[2] Ci si riferisce per esempio, nel caso di TLS, alla distinzione tra risoluzione strumentale e risoluzione reale (Paris, 2010).

[3] Tale studio è parte di una ricerca di ateneo *Modelli digitali per la conoscenza, salvaguardia e gestione del patrimonio architettonico razionalista. Il Palazzo degli Uffici dell'Esposizione Universale di Roma* (responsabile scientifico Prof. Leonardo Paris) nell'ambito dell'Information Technology, con particolare riguardo all'uso delle tecnologie digitali e delle metodologie di elaborazione dei dati per l'elaborazione di modelli conoscitivi - numerici e/o continui - del patrimonio edilizio esistente.

[4] *Iterative closest point* (ICP) è un algoritmo sviluppato per minimizzare le differenze tra due nuvole di punti (Somani et al. 1987; Besl 1992).

[5] L'intero edificio è solo in parte in uso dell'Ente Eur, la restante è data in locazione ad altre società, per cui si è posto un problema di coordinamento temporale delle diverse fasi di acquisizione degli ambienti interni.

Riferimenti bibliografici

Aulinas J. et al. (2008). The SLAM problem: a survey. In T. Alsinet, J. Puyol-Gruart, C. Torras. (a cura di). *Proceedings of the 2008 conference on Artificial Intelligence Research and Development: Proceedings of the 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence*. Las Vegas, 14-17 luglio 2008, pp. 363-371. Providence: CSREA Press.

Besl P.J., McKay N.D. (1992). A Method for Registration of 3-D Shapes. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2), pp. 239-256.

Bianchini C., Senatore L.J., Catena L. (2019). The Democratization of Processes and the Use of Remotely Guided Acquisition Tools for Survey 2.0. In *Disegno*, No. 4, pp. 67-78.

Calvano M., Cessari L., Gigliarelli E. (2023). Tradition in Innovation. Some Considerations on SLAM Technique. Integration for Historic Buildings. In M. Cannella, A. Garozzo, S. Morena (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*, Palermo, 14-16 settembre 2023, pp. 2521-2530. Milano: FrancoAngeli.

Migliari R. (2003). *Geometria dei modelli. Rappresentazione grafica e informatica per l'architettura e per il design*. Roma: Kappa.

Paris L. (2010). Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura. In *Proceeding of the X Congresso Internazionale Espresión gráfica aplicada a la edificación*, Alicante, 2-4 dicembre 2010, vol. I, pp. 279-289. Alicante: Editorial Marfil.

Saba A., Gon-Woo K. (2021). Role of Deep Learning in Loop Closure Detection for Visual and Lidar SLAM: A Survey. In *Sensors* 2021, 4(21), p. 1243. <<https://doi.org/10.3390/s21041243>>

Somani A, Huang T.S, Blostein S.D. (1987). Least-square fitting of two 3-D point sets. In *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9 (5), pp. 698-700.

Yang C., Medioni G. (1991). Object modelling by registration of multiple range images. In *Image Vision Comput*, vol. 10, n. 3, pp. 145-155.

Autori

Leonardo Paris, Sapienza Università di Roma, leonardo.paris@uniroma1.it
Maria Laura Rossi, Sapienza Università di Roma, marialaura.rossi@uniroma1.it

Per citare questo capitolo: Leonardo Paris, Maria Laura Rossi (2024). Quantità e qualità nell'utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura/Quantity and quality in the use of SLAM technology for architectural surveying. 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. 1857-1876.

Quantity and quality in the use of SLAM technology for architectural surveying

Leonardo Paris
Maria Laura Rossi

Abstract

Among the new tools for digital shape acquisition, in the architectural surveying there is an increasingly widespread use of the SLAM technology, a mobile scanner capable of recording the movement of a sensor along a trajectory in real-time and mapping the main characteristics geometric shapes of the environment in which the sensor is moving. SLAM instruments, despite using an already widespread Lidar mode, are not a simple evolution of TLS but represent a real technological leap as the laser sensor is also associated with an IMU inertial platform. The data obtained from the two sensors are then optimized through a real-time analysis of the detected geometries.

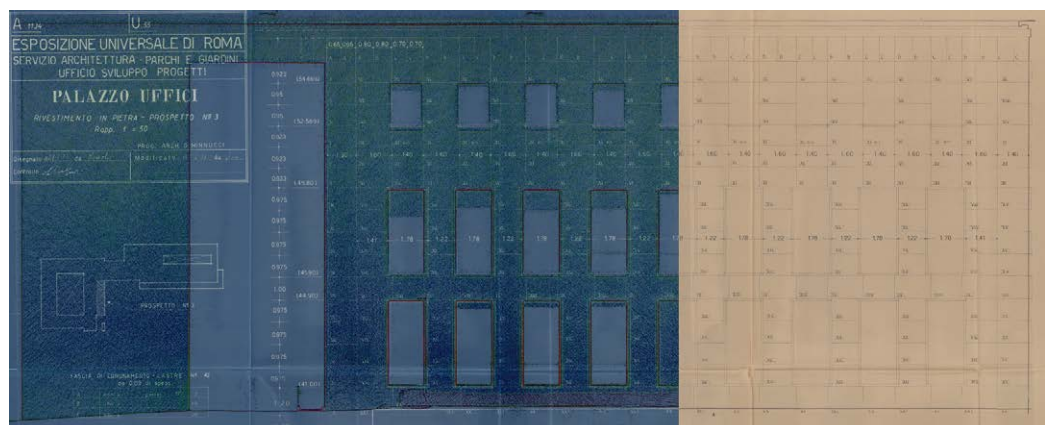
The considerations of this contribution derive from some experiments on the Office Palace at the EUR in Rome in which we wanted to test the reliability and precision of the SLAM data compared to TLS and/or IBM also in order to obtain integrated metric information homogeneous. A further level of experimentation concerned, in the post processing phase, the optimization of the quality of the raw data and the subsequent merging operations between the different point clouds.

In this scenario, careful planning of the digital acquisition phase becomes even more relevant in order to optimize the relationship between the quantity of metric information and the quality of the representation models.

Keywords

SLAM, Digital Integrated Survey, Built Heritage, 3D shape acquisition, Points Cloud

Palazzo degli Uffici, EUR, Rome.
Project by the Italian engineer and architect Gaetano Minucci.
Graphic work relating to the dimensional variations (even millimetric) of the travertine slabs covering the facades.
Partial graphic overlap with the digital data from integrated survey that highlights the correspondence between the designed work and the built one.



Metric acquisitions and technological leaps

The evolution of digital technology applied to architectural surveying [1] has had consequences. One of these is having progressively accentuated the separation between the acquisition and restitution phases. The main purpose of the first phase is metric information which today almost always takes the form of a point cloud; depending on the different methodologies and techniques used, it is possible to associate other information, such as color, reflectance, thermal response, etc. The metric information is the result of an initial processing of multiple data obtained from the instrument. The Cartesian coordinates of a point cloud are the product of a processing based on a series of data obtained from the instrument.

Acquisition capacity has grown exponentially in recent decades although in the evolution of digital technology it is always appropriate to make a distinction between developments that increase performance (a laser scanner today is considerably faster and more accurate than one from twenty years ago) and innovation that determines a technological leap. In the latter case, a consequent disciplinary methodological update often occurs. The terrestrial laser scanner (TLS) is based on an acquisition method already in use with the total station (that of the polar coordinates associated with a distance acquired with the laser) but there is no doubt that this instrument represented a leap in the evolution of instruments of 3D shape acquisition. A leap that is not only in terms of speed and number of points per second but which is substantial both in terms of accuracy and reference to the real object [2].

Thus, over time, that different relationship in the acquisition/return combination mentioned above has been consolidated.

Something similar also happened in photogrammetry (IBM - Image-Based Modeling) in the transition from the digital one, in use in the 80s and 90s of the last century, to the digital one, in common use today. With an aggravating circumstance when the dense, unstructured point cloud is "automatically" converted into geometric information (mesh) which is very often of little value for the purposes of developing effective representation models. In reality, the processing of the mesh does not occur automatically but by applying an algorithm with a substantial loss of cognitive control of the detected object.

Both in the use of the terrestrial laser scanner and in photogrammetry, the need to define methodological criteria capable of evaluating the right relationship between quantity and quality of metric information in the acquisition phase with consequent implications in the restitution phase therefore appeared evident and urgent. The experiences we have gained over decades of digital surveys have highlighted the undoubted advantages of digital technological evolution with, on the other hand, some critical issues. The excessive quantity of metric information, for example, can negatively affect the return phase and is not always

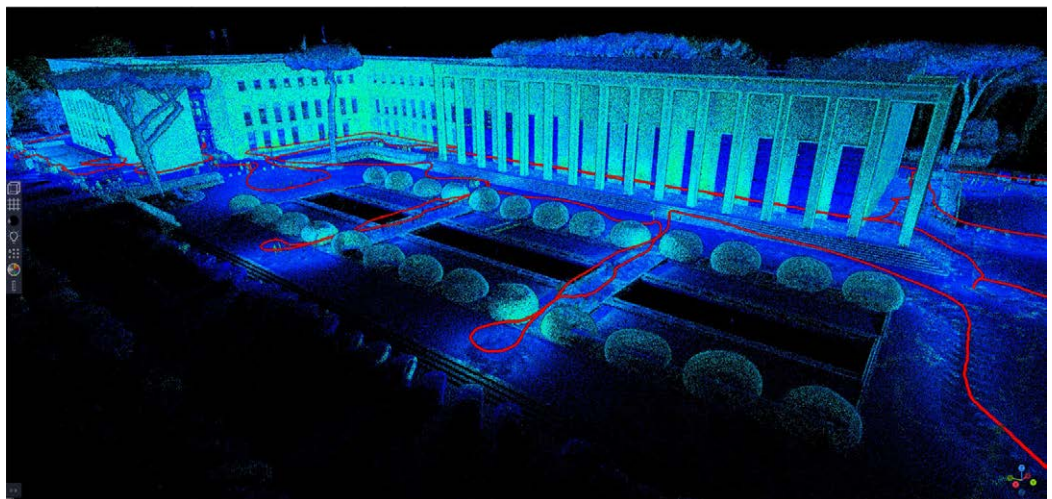


Fig. 1. Visualization of the acquisition trajectory with SLAM technology outside the Palazzo degli Uffici, Rome. Elaboration by the authors.

synonymous with quality. Compared to these premises, it is interesting to evaluate another more recent technological leap represented by SLAM acquisition technology. The acronym (Simultaneous Localization and Mapping) defines the technology capable of recording in real time the movement of a sensor along a trajectory and mapping the main geometric characteristics of the environment in which the sensor is moving (fig. 1).

It is a technology born at the end of the last century in the field of robotic engineering [Aulinas et al. 2008] and which, recently - also thanks to progress in processing speed and the availability of low-cost sensors - is becoming increasingly also spreading into architectural relief. There are currently two main SLAM categories, the visual one and the Lidar one [Arshad 2021]. The first (vSLAM) uses images acquired by cameras and therefore exploits the acquisition and processing procedures used in photogrammetry, the second mainly uses a laser sensor and is able to provide more precise metric information than the first.

The most evident leap compared to the two methodologies most used in recent decades (TLS and IMB) is in the change of the "projection center" which in SLAM is transformed into a trajectory, i.e. from a fixed point to a line.

SLAM technology for architectural surveying

In most architectural survey applications, an integrated approach is now consolidated in the acquisition phase with the contemporary use of different 3D shape acquisition methodologies. In this way it is possible to optimize the times, costs and quality of the survey by adapting the different methodologies to the characteristics of the detected object [Bianchini et al. 2019]. It therefore becomes increasingly essential to carefully plan the acquisition phase. As regards TLS and IMB there is now a consolidated literature on the matter. For SLAM acquisitions, however, we are still in an experimental phase also in relation to the continuous evolution of the tools [Calvano et al. 2023].

The first consideration to make concerns the quality of the point cloud obtained through SLAM which is conditioned by both the instrumental technology and the method of use.



Fig. 2. GEOSLAM Zeb Horizon: the instrument operates in dynamic and continuous mode with the movement of the operator, who has the possibility of seeing in real time through a smartphone the construction of the point cloud in relation to the trajectory performed. Elaboration by the authors.

Most devices on the market use a rotating LiDAR sensor, i.e. equipped with laser distance reading associated with an inertial platform (IMU). The metric information, however, is not calculated simply as a combination of the two sensors but also as a real-time analysis of the detected geometries. The point cloud of the detected environment is therefore obtained through an iterative process capable of improving the estimate of the coordinates of the detected points. More iterations - which however require greater computing power - increase the quality of the result. SLAM acquisition produces a greater amount of noise than, for example, TLS, even if many software have algorithms capable of eliminating the excessive dispersion of the points returned by the instrument during the post processing phase. The quality of the result, which is always conditioned by both the instrument and its use, in this case also includes a dynamic component defined by the trajectory and speed - and



Fig. 3. Georeferencing of the IBM cloud (bottom) starting from some points with known coordinates - local and absolute - queried on the TLS cloud. Elaboration by the authors.

therefore time - of acquisition. The individual point clouds, which in TLS are referred to fixed point stations, are in this case obtained from blocks of paths decided by the operator at a certain acquisition speed. All the evaluations made in TLS and IBM mode on the so-called gray areas are mostly resolved in relation to the fact that the recovery is not point-like but linear. The identification of linear blocks is also inevitably influenced by the characteristics of the instrument used. The considerations reported in this contribution refer to some experiments in which we wanted to test the reliability and precision of the data acquired through SLAM technology compared to TLS and/or IBM also in order to obtain homogeneous integrated metric information. A further level of experimentation was, in the post processing phase, linked to the optimization of the quality of the raw data and the subsequent merging operations between the different point clouds within the same reference system.

A case study: the Office Palace in Eur

An application case of experimentation with these new digital technologies of massive acquisition, and the consequent digital techniques of data integration, was the Office Palace [3] designed by the engineer Gaetano Minnucci in 1937 in the EUR district of Rome. It was the first permanent work to be completed in the vast project of the Universal Exhibition of Rome, considered the “pilot” building for all the other E42 creations.

The building survey operations involved the use of three instruments: TLS FARO FOCUS X 130, IBM with DJI Mavic drone and GEOSLAM Zeb Horizon (fig. 2). The SLAM tool is one of the medium-high range ones and allows you to acquire control points during the journey to which you can associate a system of known georeferenced coordinates, which in turn can optimize the point cloud processing algorithm.

A further level of optimization is given by acquisitions made with closed trajectories in

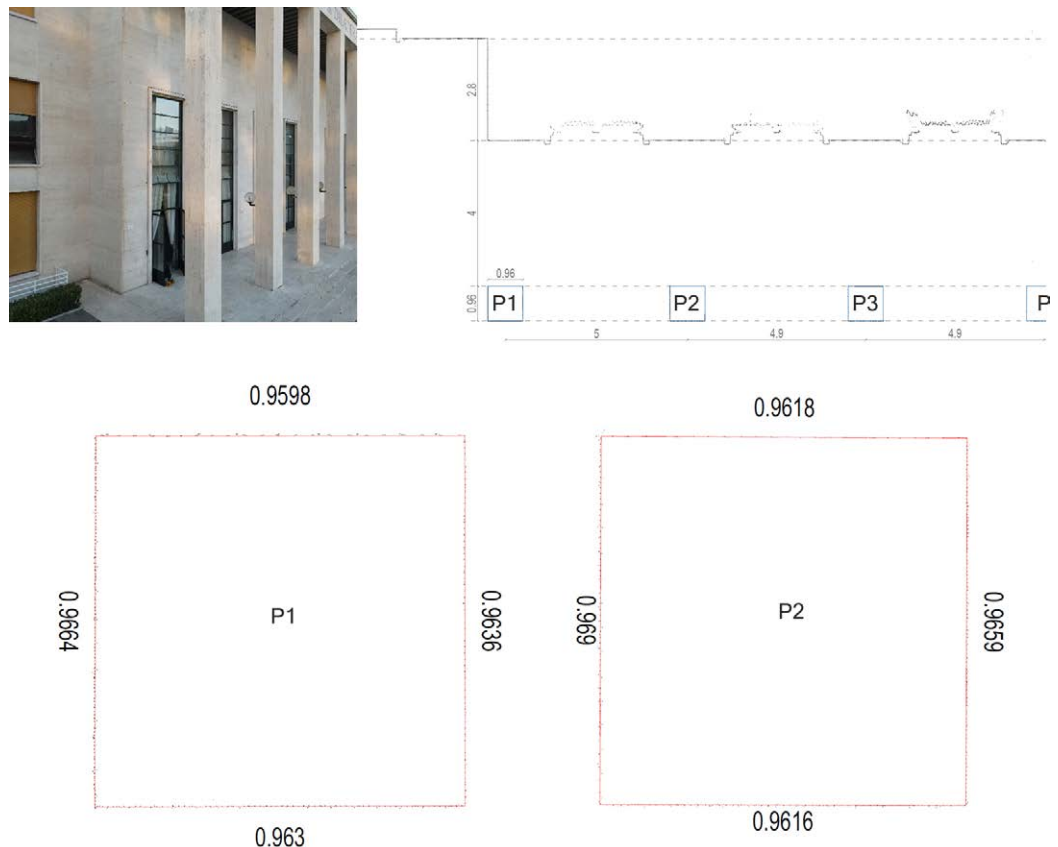


Fig. 4. The interpolation of the points detected along a surface is all the more probable and accurate the more dense the survey data is and has low noise. These polygonal layouts must then be critically reviewed in terms of measurement, associating shape, geometry, proportion and design factors. Elaboration by the authors.

which the first and last control points coincide.

3 circuits were carried out, one outside the building, one inside, and one on the roof. The point clouds thus obtained were recorded on the same reference system and correlated with the other TLS and IBM point clouds.

The cloud obtained from photogrammetric acquisitions was processed and scaled through the insertion of markers with known coordinates selected by interrogating the cloud from a georeferenced scanner so as to guarantee an overlap in size and position between the two. The construction of the sparse cloud, automatically generated by the alignment of the images, and the scaling and georeferencing operations generated an error of less than 4 cm. To avoid problems reading the georeferenced coordinates, usually kilometers away from the origin of the reference systems of point cloud management software, a query in a local reference system was adopted, then applying a rigid transformation in space to the photogrammetric cloud consistent with the global system (fig. 3).

Considering the centimeter error of the photogrammetric cloud and a widespread noise dictated by the automatic construction of an unstructured point cloud, it was decided to take the scanner cloud as a reference, much more defined and with a millimetric error, to optimize the recording of the clouds from SLAM.

In particular, by extrapolating a horizontal slice of 5 cm thickness, it is possible to see with extreme precision the definition of the section profiles of the various components. For example, taking as reference the profiles of the square section colonnade of the public hall (fig. 4) it is possible to notice how the high density of the cloud and a surface noise lower than 4 mm are able to limit the uncertainty in the interpolation of points being refunded. The analysis of the cloud returns a section with a side of 96 cm (+/- 3mm), different from that hypothesized based on the reading of the archive documents of the Minnucci collec-

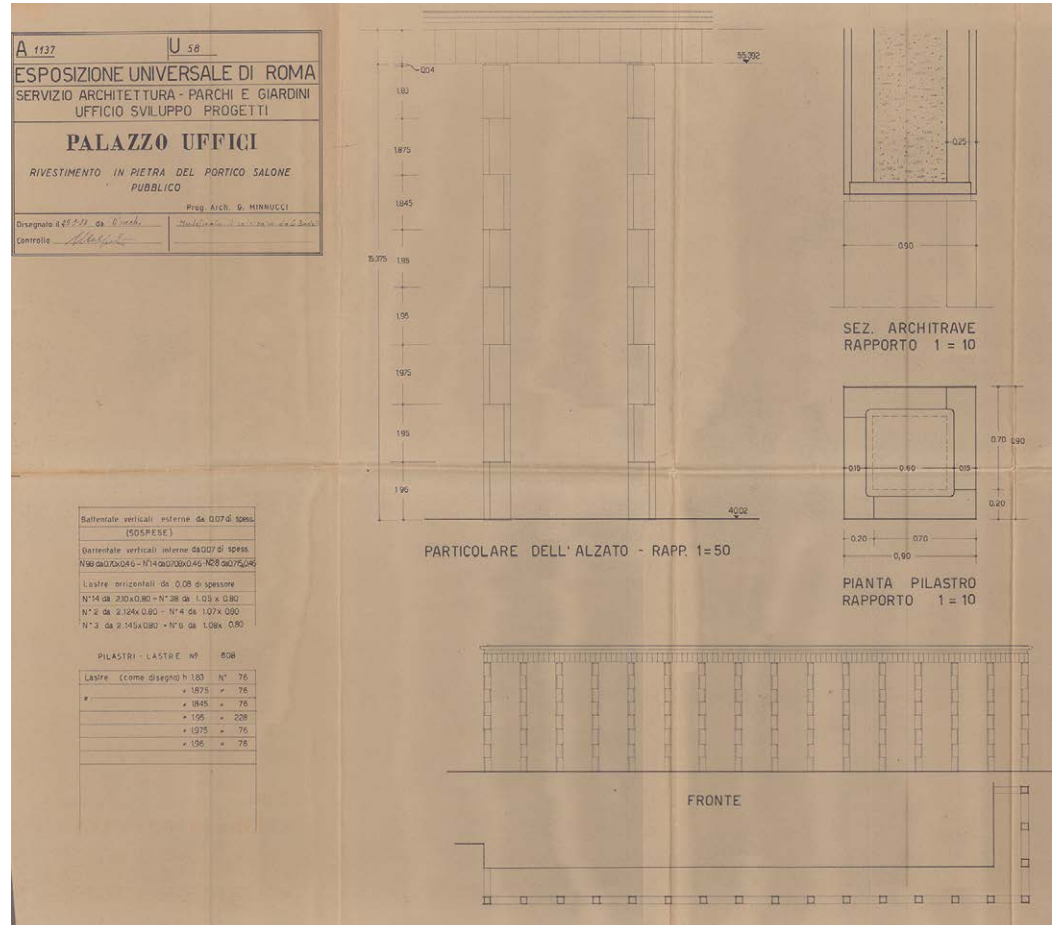


Fig. 5. Project document from the Minnucci collection present in the State Archives of Rome. Detail of the cladding of the colonnade of the portico of the public hall: finishing included, the square columns are 90x90cm in size, differently from what was created (Fondo Minnucci, Archivio di Stato di Roma).

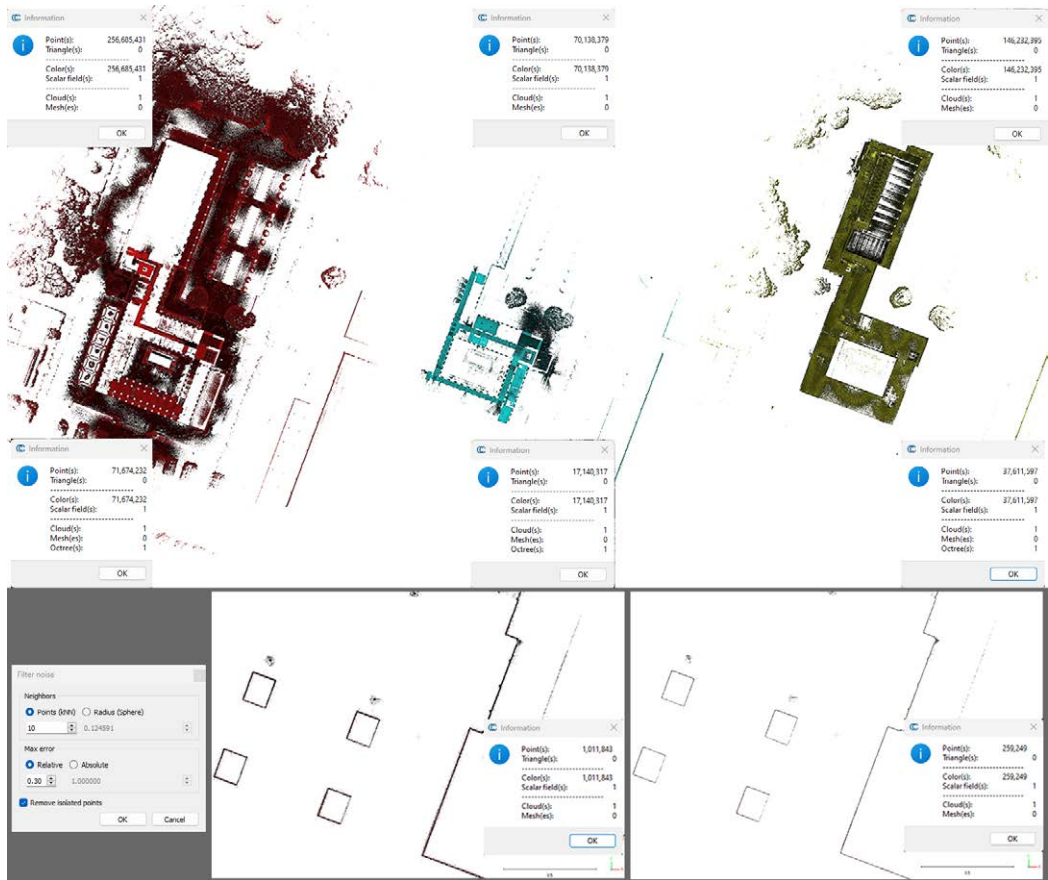


Fig. 6. Application in CloudCompare of a noise reduction and isolated point elimination algorithm on Slam clouds. The operation, in addition to making the detected geometry more defined, significantly reduces the weight of each cloud - from hundreds of millions of points to a few dozen - making the calculation system more agile and streamlined. Elaboration by the authors.

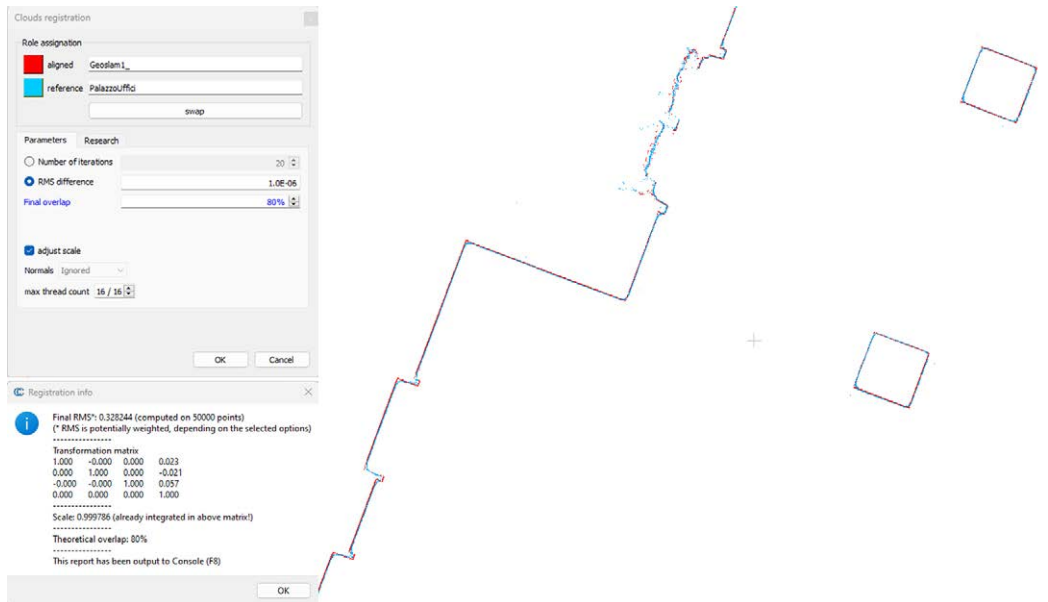


Fig. 7. Application of the ICP distance reduction algorithm between two point clouds on highly overlapping areas. The process generates the transformation matrix applicable to the zones with a lower overlap percentage. Elaboration by the authors.

tion (fig. 5).

Having therefore assessed the reliability in terms of precision of the TLS cloud, taken as a reference, it was possible to optimize the quantity and quality of the other clouds to obtain a single point cloud which presented characteristics of homogeneity and reliability of the

information.

The Geoslam clouds were previously filtered to reduce noise, testing the effectiveness of some algorithms and their initial settings at this stage (fig.6).

The reduction of noise on the clouds allowed a more accurate selection of some significant points (edges, corners, etc.) whose coordinates were then associated with the global reference system.

The recording of georeferenced clouds was refined by applying the ICP [4] algorithm which analyzes the correspondences between cloud and cloud. For each pair of clouds, only the shared portions were isolated, so as to avoid lengthy calculations and possible errors due to the analysis of non-overlapping areas. At the end of each operation, the matrix with the roto-translation components was applied to the overall clouds. The procedure was repeated for each Geoslam cloud with reference to the TLS cloud (fig.7).

Another objective of this research was to experiment through comparisons between data, the different results obtained, thus validating the procedure followed and certifying the reliability of the final point cloud, the result of the merger of the individual clouds, through the clarification of the various deviations.

By randomly selecting some overlapping areas it was possible to generate a graphic-metric visualization of the difference between a reference cloud - scanner - and the aligned one - geoslam and/or photogrammetry (fig.8) [Yang, Medioni 1991].

The overall cloud, optimized from the point of view of noise, definition and various superpositions, was based on critical operations of interpretation of the shape and dimensions of the various architectural components, integrating the metric dimension of the survey data with what was suggested from the project graphics which were reflected in a large part of the building (fig.9).

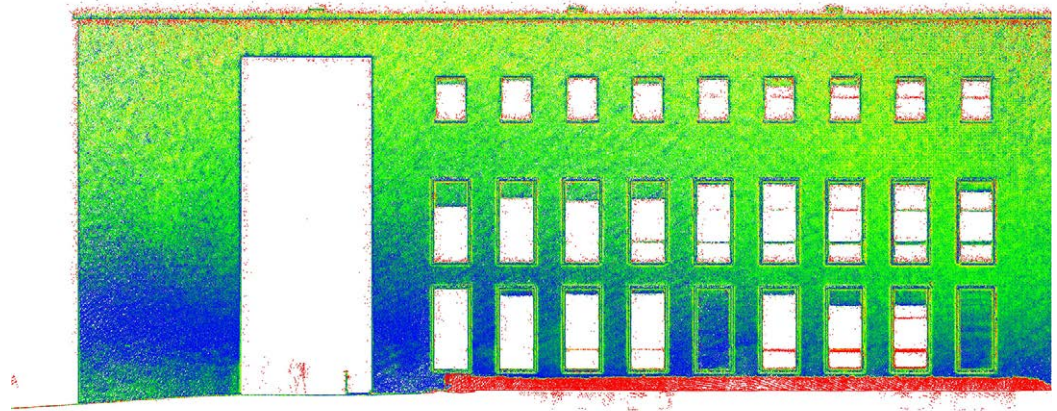
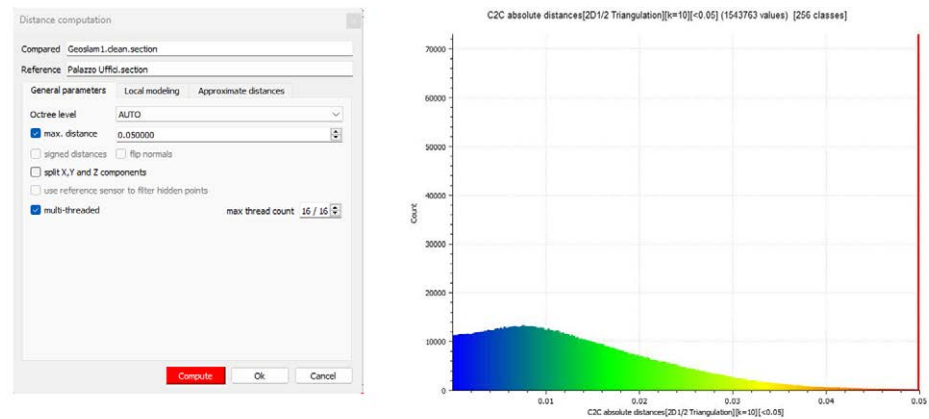


Fig. 8. Analysis of the deviation on an overlap surface between a TLS cloud and a SLAM cloud. The calculation, set to a maximum value of 5 cm (exceeded only in the areas of non-overlap, gaps in both clouds), is less than 1cm in the low areas (4m) closest to the origin of the instrument, less than 3 cm in the upper parts close to the cover. Elaboration by the authors.

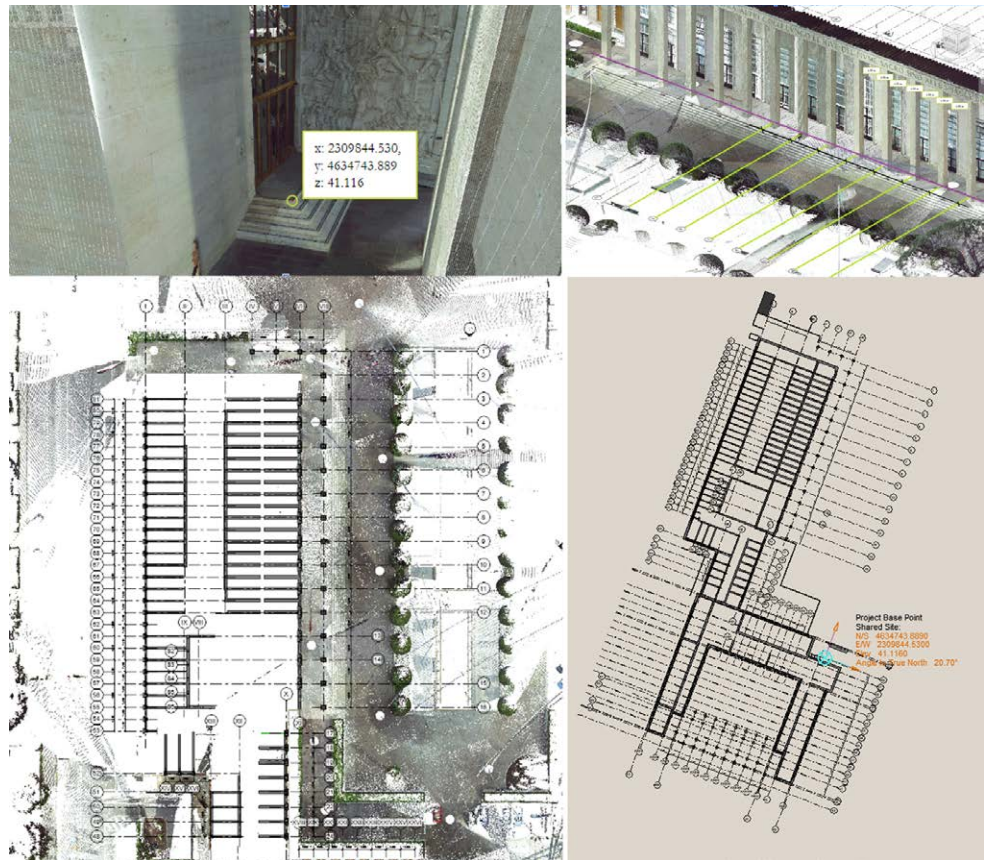


Fig. 9. Setting the global reference system within the digital environment for building mathematical models. Import and critical analysis of survey data: tracing of reference planes and structural grids for the identification of alignments and modular steps. Elaboration by the authors.



Fig. 10. Perspective view of the continuous digital model: external view of the portico of the public hall. Elaboration by the authors.

Conclusions

The experimentation carried out on the EUR Office Building highlighted the considerable potential in the use of SLAM technology in architectural surveying. A large building with a complex distribution of internal environments, with most of the rooms used for the most diverse administrative needs [5], with only the massive use of TLS would have led to ex-

tended times and the management of large data files. The metric information obtained from Geoslam has proven effective, both in terms of resolution and accuracy, for the purposes of developing representation models, also taking into account the formal characteristics of the building surveyed. The definition of a project in the acquisition phase with the integrated use of different techniques and methodologies (GPS, TLS, IBM and SLAM) represents a fundamental moment which not only concerns the correct application of a technology but also the definition of the quality level in the elaboration of representation models (fig.10).

Notes

[1] In particular, we are referring to a specific phase of architectural surveying, that of metric acquisition, which is only part of that broad cognitive process that distinguishes the scientific discipline of surveying.

[2] For example, in the case of TLS, we refer to the distinction between instrumental resolution and real resolution (Paris, 2010).

[3] This study is part of a university research project into *Digital models for the knowledge, protection and management of rationalist architectural heritage. The Office Building of the Universal Exhibition of Rome* (scientific director Prof. Leonardo Paris) in the field of Information Technology, with particular regard to the use of digital technologies and data processing methodologies for the development of cognitive models - numerical and/or continuous - of the existing building stock.

[4] Iterative closest point (ICP) is an algorithm developed to minimize the differences between two point clouds (Somani et al. 1987; Besl 1992).

[5] The entire building is only partly in use by the Eur Institution, the remainder is leased to other companies, so a problem arose of temporal coordination of the different phases of acquisition of the internal environments.

References

- Aulinas J. et al. (2008). The SLAM problem: a survey. In T. Alsinet, J. Puyol-Gruart, C. Torras. (Eds.). *Proceedings of the 2008 conference on Artificial Intelligence Research and Development: Proceedings of the 11th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence*. Las Vegas, 14-17 luglio 2008, pp. 363-371. Providence: CSREA Press.
- Besl P.J., McKay N.D. (1992). A Method for Registration of 3-D Shapes. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2), pp. 239-256.
- Bianchini C., Senatore L.J., Catena L. (2019). The Democratization of Processes and the Use of Remotely Guided Acquisition Tools for Survey 2.0. In *Disegno*, No. 4, pp. 67-78.
- Calvano M., Cessari L., Gigliarelli E. (2023). Tradition in Innovation. Some Considerations on SLAM Technique. Integration for Historic Buildings. In M. Cannella, A. Garozzo, S. Morena (Eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*, Palermo, 14-16 settembre 2023, pp. 2521-2530. Milano: FrancoAngeli.
- Migliari R. (2003). *Geometria dei modelli. Rappresentazione grafica e informatica per l'architettura e per il design*. Roma: Kappa.
- Paris L. (2010). Quantità e qualità nell'utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell'architettura. In *Proceeding of the X Congresso Internazionale Espressione grafica applicata a la edificación*, Alicante, 2-4 dicembre 2010, vol. 1, pp. 279-289. Alicante: Editorial Marfil.
- Saba A., Gon-Woo K. (2021). Role of Deep Learning in Loop Closure Detection for Visual and Lidar SLAM: A Survey. In *Sensors* 2021, 4(21), p. 1243. <<https://doi.org/10.3390/s21041243>>
- Somani A, Huang T.S, Blostein S.D. (1987). Least-square fitting of two 3-D point sets. In *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9 (5), pp. 698-700.
- Yang C., Medioni G. (1991). Object modelling by registration of multiple range images. In *Image Vision Comput*, vol. 10, n. 3, pp. 145-155.

Authors

Leonardo Paris, Sapienza University of Rome, leonardo.paris@uniroma1.it
Maria Laura Rossi, Sapienza University of Rome, marialaura.rossi@uniroma1.it

To cite this chapter: Leonardo Paris, Maria Laura Rossi (2024). Quantità e qualità nell'utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura/ Quantity and quality in the use of SLAM technology for architectural surveying. 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. 1857-1876.