

Il Progetto ARCHIM3DES: ARchaeological and Cultural Heritage documentation In Marine environment using advanced 3D mEtric Survey techniques

Antonella Antonazzo¹, Cristiano Alfonso¹, Rita Auriemma¹ [0000-0002-6509-4787], Edward Borgogno² [0009-0000-5564-6433], Filiberto Chiabrando² [0000-0002-4982-5236], Elisabetta Colucci² [0000-0001-8635-3066], Luigi Coluccia¹, Andrea Maria Lingua³ [0000-0002-5930-2711], Paolo Felice Maschio³ [0000-0001-7706-9354], Francesca Matrone³ [0000-0002-9160-1674], Alessandra Spreafico² [0000-0002-6896-5517], Beatrice Tanduo² [0000-0003-2254-0318]

¹ Dipartimento Beni Culturali, Università del Salento, Via Dalmazio Birago, 64, Lecce (LE) – (antonella.antonazzo, cristiano.alfonso, rita.auriemma, luigi.coluccia)@unisalento.it

² Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (Lab G4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125, Torino (TO) - (edward.borgogno, filiberto.chiabrando, elisabetta.colucci, alessandra.spreafico, beatrice.tanduo)@polito.it

³ Laboratorio di Geomatica, Dipartimento di Ingegneria dell'ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, Corso Duca Degli Abruzzi 24, 10129, Torino, (TO) - (andrea.lingua, —

Abstract. Nel corso degli anni, il crescente interesse della comunità scientifica per il rilievo e il monitoraggio dei beni sommersi ha portato a una sempre più ampia domanda di prodotti 3D ad alta risoluzione provvisti di contenuto metrico e radiometrico accurato e affidabile. Il progetto ARCHIM3DES (*ARchaeological and Cultural Heritage documentation In Marine environment using advanced 3D mEtric Survey techniques*), finanziato con il bando PRIN 2022, si concentra sullo sviluppo e l'integrazione di tecnologie e metodi innovativi per il rilievo, il monitoraggio, la conservazione in situ e la valorizzazione del patrimonio culturale sommerso, ponendo un focus specifico sui relitti antichi.

Parole chiave: rilievo subacqueo, patrimonio sommerso, archeologia subacquea, fotogrammetria, realtà virtuale

1 Introduzione

Il patrimonio culturale sommerso costituisce una risorsa preziosa sotto il profilo ecologico, scientifico, educativo ed economico, e necessita quindi di operazioni di conservazione e valorizzazione adeguate per continuare ad offrire benefici significativi alle comunità che ne fruiscono.

La crescente richiesta di prodotti 3D ad alta risoluzione che supportino le operazioni di conservazione e valorizzazione dei siti archeologici sommersi ha aperto una serie di sfide nel campo del rilievo e del monitoraggio subacquei.

In particolare, i relitti di imbarcazioni antiche (arenati, a bassa-media profondità e ad alta profondità) di età Protostorica e Medievale rappresentano un esempio di evidenza archeologica particolarmente impegnativo per quanto concerne l'accessibilità e la possibilità di documentazione [1, 2]. La difficoltà nel documentare questo tipo di siti archeologici è dovuta principalmente alla loro collocazione (in termini di posizione e profondità), e alla loro vulnerabilità intrinseca (scafo in legno, carichi in materiale organico, ecc.).

Sebbene molte soluzioni tecnologiche e metodologiche per la documentazione, il monitoraggio e lo studio dell'archeologia e del patrimonio costruito, attraverso tecniche

geomatiche, siano già disponibili per l'ambiente terrestre, per il contesto subacqueo (che rappresenta più del 70% della superficie del nostro pianeta), la sfida è ancora aperta [3].

L'obiettivo del progetto è quindi quello di accelerare e rendere più redditizio il lavoro degli archeologi, garantendo nel contempo le condizioni di sicurezza durante le operazioni subacquee, grazie all'uso della fotogrammetria subacquea e l'integrazione di vari tipi di camere e sensori (come sonar e multibeam) installati su ROV o droni di superficie a comando remoto.

1.1 Stato dell'arte

Dopo la Convenzione dell'UNESCO sulla protezione del patrimonio culturale subacqueo (2001), la nuova fase del processo attuale di riappropriazione del patrimonio culturale come valore comune, bene "popolare", è rappresentata dalla Convenzione quadro sul valore del patrimonio culturale per la società, adottata dal Comitato dei Ministri del Consiglio d'Europa il 13 ottobre 2005 a Faro e ratificata dall'Italia il 23 settembre 2020 (Camera dei Rappresentanti). La Convenzione ha avuto il merito di definire un concetto rivoluzionario di patrimonio culturale, inteso come l'insieme delle risorse ereditate dal passato, individuate dai cittadini come riflesso ed espressione dei loro valori, credenze, conoscenze e tradizioni in continua evoluzione. Questi principi sono alla base della catena di ricerca, conservazione, protezione, gestione e partecipazione che il progetto ARCHIM3DES intende perseguire, promuovendo la nascita di un ambiente sociale, politico ed economico sostenibile e multiculturale. È un fatto che alle attività legate al Patrimonio Sommerso è sempre più richiesto di avere un ritorno sociale al di là dell'aspetto culturale, cercando un impatto positivo sul tessuto economico e sociale di una comunità. D'altra parte, le linee guida dell'Unione europea promuovono la crescita blu e il turismo responsabile e sostenibile legato al paesaggio marino e costiero e al Patrimonio Culturale Sommerso.

Sperimentare il passato sott'acqua sta rapidamente diventando un enorme vantaggio nel settore del tempo libero e nella "economia dell'esperienza". Questo sviluppo implica rischi e opportunità per la protezione, in quanto non tutti i siti sommersi possono essere facilmente raggiungibili, per differenti ragioni: posizione, profondità e sicurezza/integrità dei beni, ma anche capacità e conoscenze tecniche relative alla subacquea dei ricercatori, dei cittadini, degli enti interessati e dei turisti.

1.2 Obiettivi

Sulla base dei principi della Convenzione di Faro (2015), lo scopo principale del progetto ARCHIM3DES è quello di rendere facilmente fruibile il patrimonio sommerso, promuovendo una migliore conoscenza dello stesso ed individuando la necessità di un nuovo tipo di relazione tra comunità e patrimonio, incoraggiando un coinvolgimento attivo nella sua conservazione.

Attraverso l'integrazione di diverse tecniche geomatiche, come l'impiego di fotogrammetria subacquea e l'utilizzo di differenti camere e sensori (sonar, multibeam, etc.) integrati su ROV (Remotely Operated Vehicles) subacquei e USV (Uncrewed Surface Vessels), il progetto mira a rendere accessibili i reperti archeologici sommersi e il paesaggio marino, non solo agli esperti di dominio ma anche ad un pubblico più ampio, attraverso la realizzazione di modelli 3D ad alta risoluzione e la creazione di tour immersivi in ambiente di realtà virtuale.

Nello specifico, gli obiettivi includono l'incremento della ricerca scientifica sui relitti antichi dell'area Ionica e Adriatica, la promozione della ricerca sui cambiamenti del livello del mare

e la conseguente evoluzione dei paesaggi costieri, e la condivisione di tale conoscenza per garantire una efficace conservazione e protezione in situ dei relitti, secondo i principi della Convenzione UNESCO sulla protezione del patrimonio culturale subacqueo (2001). Dal punto di vista tecnico e tecnologico il progetto si prefigge l'obiettivo di sviluppare e testare un sistema di documentazione multi sensore 3D non invasivo, e di definire quindi una metodologia operativa volta ad ottimizzare tutte le fasi del rilievo subacqueo.

1.3 Casi studio

I casi studio individuati sono tre relitti di imbarcazioni antiche (Figura 1), situati a differenti profondità (arenati, a bassa-media profondità, e ad alta profondità) lungo le coste del Mar Ionio e del Mar Adriatico:

- a) Il relitto tardo imperiale denominato Torre Santa Sabina 1, arenato nella Baia dei Camerini a Torre Santa Sabina, in provincia di Brindisi;
- b) Il relitto tardo repubblicano di Torre Sinfonò, situato al largo di Ugento, a 50 metri di profondità;
- c) Infine, un relitto situato ad alta profondità, da individuare prossimamente.



Figura 1. Il relitto di Torre Santa Sabina 1 e il carico di anfore del relitto di Torre Sinfonò.

2 Metodologia

La metodologia impiegata nel progetto prevede l'implementazione di un webGIS atto a raccogliere, uniformare e georeferenziare i dati inerenti ai relitti collocati nell'area individuata come caso studio; lo sviluppo di un sistema bicamera per le acquisizioni fotogrammetriche subacquee e di un sistema di navigazione basato sul posizionamento GNSS multi-costellazione per il sistema USV; lo svolgimento di test per l'individuazione di una strategia di posizionamento per il ROV subacqueo; l'integrazione di diversi sensori per lo sviluppo di un sistema acustico-visivo ibrido USV-ROV; e lo studio di differenti approcci per l'ottimizzazione dell'acquisizione e dell'elaborazione di dati ad elevata qualità e

precisione, nonché l'integrazione e la fusione degli stessi. L'integrazione dei dati provenienti dai vari sensori e dalle diverse tecniche di rilievo, assieme alle conoscenze e ai risultati derivanti dagli studi archeologici, permetteranno di implementare un sistema di condivisione e disseminazione della conoscenza acquisita, nell'ottica del perseguimento di un "archeologia pubblica" (Figura 2).

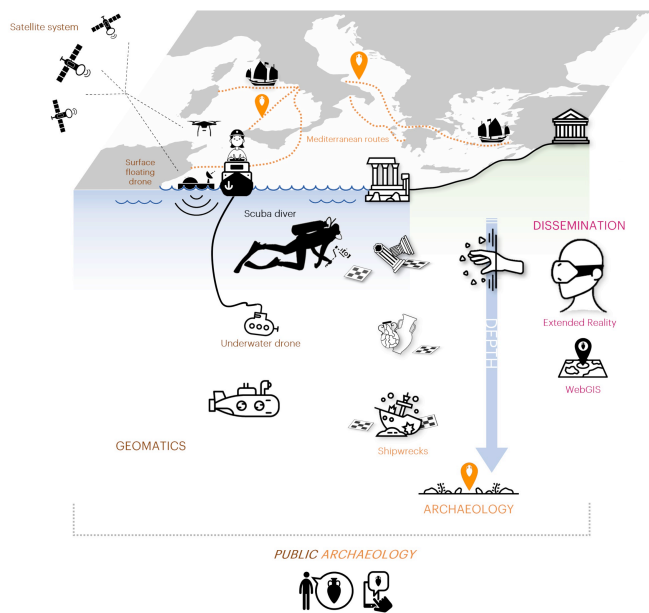


Figura 2. Workflow metodologico e operativo del progetto ARCHIM3DES.

Tra le sfide affrontate dal progetto vi sono la calibrazione geometrica delle camere impiegate per il rilievo fotogrammetrico, la correzione radiometrica delle immagini acquisite [4], il posizionamento e la navigazione subacquea e marina, e la creazione, visualizzazione e condivisione di modelli 3D multi risoluzione attraverso piattaforme web (open source) e applicativi basati su realtà virtuale e mixed reality [5].

Per quanto riguarda il rilievo fotogrammetrico è stato concepito un sistema costituito da due camere Sony ILX-LR1 [6] con sensori full frame da 60 MP in grado di acquisire simultaneamente coppie stereoscopiche ad alta risoluzione. Le camere sono protette da custodie in alluminio anodizzato a tenuta stagna e rese solidali da una base di presa fissa alla quale vengono installati anche i corpi illuminanti in grado di emettere complessivamente oltre 40000 lumen (Figura 3). La base di presa nota permette di scalare il modello 3D ricostruito da algoritmi di Structure From Motion (SfM) senza ricorrere all'acquisizione di punti di appoggio che a profondità elevate può rappresentare un problema.

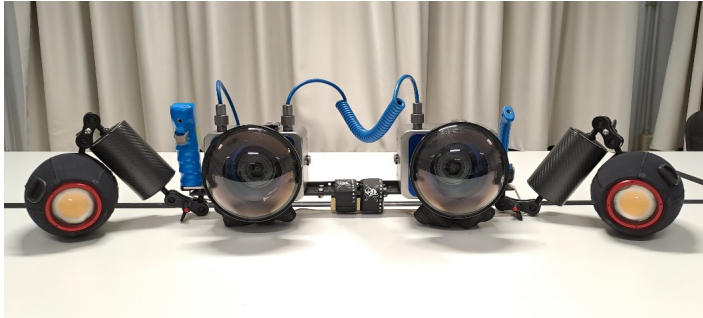


Figura 3. Sistema a due camere sincronizzate montate su base di presa fissa con corpi illuminanti.

Le ottiche delle due camere osservano la scena subacquea attraverso due dome emisferici dei quali sono stati misurati i raggi di curvatura (90 mm) per ricavare la lunghezza focale [7]. Attraverso misurazioni dirette con accuratezze al decimo di millimetro e l'installazione di distanziali regolabili sui corpi delle camere è stato possibile centrare le camere con i rispettivi dome.

La verifica del centramento delle ottiche delle camere rispetto ai centri dei dome invece è stata condotta in ambiente controllato ed eseguita mantenendo la camera per metà in acqua in modo da riprendere un pannello di calibrazione, anch'esso immerso per metà in acqua, verificando che le due porzioni di immagine, fuori dall'acqua e sott'acqua, fossero a fuoco e che le linee verticali del pannello non subissero distorsioni [8-9]. Questo metodo ha anche permesso di valutare la distanza di messa a fuoco e la profondità di campo ottimali in base alla distanza di acquisizione in quanto l'immagine prodotta attraverso il dome immerso in acqua risulta ravvicinata rispetto alla distanza reale dell'oggetto ripreso.

Al momento il dispositivo è pensato per un utilizzo da parte di un operatore subacqueo ma la componente elettronica del sistema ne predispone anche un utilizzo autonomo in combinazione con un ROV.

I primi test eseguiti col sistema bicamera ci hanno permesso di testarne il corretto funzionamento: le acquisizioni inerenti al test sono state effettuate in ambiente marino a una profondità di circa 6-7 metri. È stato utilizzato un pannello di calibrazione a scacchiera standard e un cubo di calibrazione autocostruito dotato di target codificati le cui posizioni reciproche sono state misurate e calcolate utilizzando una stazione totale.

Successivamente per ognuna delle due camere del sistema (camera A e camera B) è stata eseguita separatamente la calibrazione geometrica e si sono poi individuate e definite le diverse coppie di fotogrammi acquisiti in modo automatico utilizzando l'approccio multi-camera del software Agisoft Metashape. Il modello fotogrammetrico ottenuto elaborando le immagini è stato messo in scala impostando la base di presa, fissa e nota a priori, tra le differenti coppie di fotogrammi (Figura 4).

Il risultato ottenuto è stato quindi validato verificando le dimensioni del pannello a scacchiera e le distanze tra i vari target del cubo di calibrazione.

Commentato [FC1]: Però questa non è la calibrazione geometrica è la valutazione del centraggio della camera o sbaglio ??

Commentato [FC2]: Distanza di messa a fuoco ??

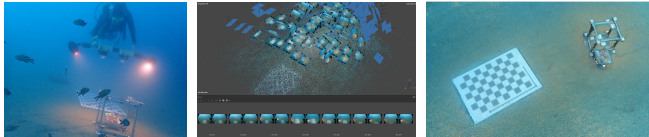


Figura 4. Foto di documentazione del test effettuato in ambiente marino, schema delle prese fotogrammetriche (ogni immagine rappresenta una coppia di fotogrammi A-B) e modello 3D ottenuto.

I dati ottenuti possono essere georeferenziati attraverso l'Underwater GPS (UGPS) Waterlinked G2 [9], un sistema costituito da un localizzatore subacqueo che emette un segnale acustico. Il segnale viene quadrilaterato da quattro ricevitori che inviano il segnale ad una centralina in superficie dotata di un ricevitore GNSS che fornisce la propria posizione assoluta. In questo modo il localizzatore montato sul dispositivo stereoscopico è in grado di tracciare in tempo reale il percorso di acquisizione eseguito sott'acqua e, tramite codice python, di registrare il dato in formato .gpx con una frequenza di acquisizione del segnale regolabile a necessità direttamente da linea di comando.

2.12 Risultati attesi

I risultati attesi, inerenti a tutte le applicazioni metodologiche previste per il progetto ARCHIM3DES, includono la creazione di modelli 3D multi risoluzione, l'implementazione di tour immersivi in ambiente di realtà virtuale e la pubblicazione di articoli scientifici in riviste ad accesso aperto per la disseminazione dei risultati e la condivisione di linee guida e best practices nell'ambito del rilievo di siti archeologici sommersi.

Nello specifico, i risultati del progetto saranno:

- i) creazione di modelli 3D multirisoluzione: il cambiamento della risoluzione del modello 3D in base al punto di vista nella scena virtuale permette di minimizzare i requisiti in termini di potenza di calcolo della GPU, utilizzo di RAM e larghezza di banda, consentendo la visualizzazione di grandi modelli alla loro piena risoluzione su una vasta gamma di dispositivi. Questa tecnica è accoppiata con annotazioni volumetriche per l'analisi scientifica e l'arricchimento semantico del modello stesso;
- ii) realtà estesa e visite immersive: l'applicazione della realtà virtuale, della realtà aumentata e mista sarà sfruttata per fornire ricostruzioni 3D e tour virtuali immersivi in grado di consentire la fruizione digitale e la narrazione dei casi studio, rendendoli accessibili e fruibili da un pubblico più vasto e non solo da pochi subacquei. Queste ricostruzioni potrebbero essere sfruttate nei musei, nelle aree marine protette (AMP) e in tutti i luoghi di cultura all'interno delle reti regionali, attraverso visori (ad es. Oculus o altri dispositivi e schermi tattili). Allo stesso tempo, la realtà estesa permetterà di rispondere all'esigenza di diffusione e studio (non solo per gli specialisti ma anche per un pubblico più vasto) con l'obiettivo finale di creare tour immersivi e ricostruzioni 3D;
- iii) pubblicazioni scientifiche, linee guida e best practices: questo punto si basa sulla diffusione dei risultati tramite articoli scientifici in riviste open-access, relazioni tecniche

Commentato [FC3]: qua non sarebbe meglio mettere qualcosa sui primi test eseguiti ??? e poi i risultati del progetto in breve ??

annuali, conferenze tematiche e workshop incentrati su aspetti distintivi legati alla richiesta di rilievi e monitoraggi ad alta risoluzione in contesti subacquei;

Inoltre, verranno proposte delle linee guida e degli standard da rispettare per l'aggiornamento dei dati provenienti da altri esperti;

iv) organizzazione di benchmark, workshop e summer school;

v) produzione di materiale promozionale per il coinvolgimento del pubblico: sito web, brochures e video.

3 Conclusioni

Il progetto ARCHIM3DES rappresenta quindi un importante avanzamento nel campo della documentazione e valorizzazione del patrimonio culturale sommerso, integrando tecniche avanzate di rilievo 3D e monitoraggio subacqueo. Attraverso l'utilizzo di tecnologie all'avanguardia, come la fotogrammetria subacquea e l'impiego di ROV e USV dotati di sensori sonar e GNSS, il progetto permette la creazione di modelli 3D ad alta risoluzione di siti archeologici, che non solo favoriscono la ricerca scientifica ma migliorano anche la fruibilità pubblica di questi beni. Il progetto si colloca nel contesto delle convenzioni UNESCO e di Faro, con l'obiettivo di valorizzare e proteggere il patrimonio sommerso come bene comune, promuovendo una maggiore consapevolezza e partecipazione della comunità. I risultati attesi, tra cui modelli 3D multirisoluzione, tour immersivi in realtà virtuale, e la diffusione di linee guida e best practices, potranno ampliare le conoscenze sull'archeologia subacquea, sostenendo il turismo culturale e responsabile e generando impatti sociali positivi. In definitiva, ARCHIM3DES getta le basi per un nuovo approccio inclusivo e sostenibile alla conservazione del patrimonio sommerso, dimostrando come la tecnologia possa diventare un alleato essenziale per la tutela e la valorizzazione dei siti archeologici, rendendoli accessibili a un pubblico ampio e diversificato, oltre che agli esperti del settore.

Questi risultati contribuiranno significativamente al progresso scientifico e tecnologico nel campo dell'archeologia subacquea fornendo algoritmi, metodi e procedure per ottimizzare la qualità dei prodotti finali e per favorire la conoscenza di questo patrimonio spesso "invisibile".

Riferimenti bibliografici

1. Auriemma, R. (2017). Relitti della Puglia meridionale: Recenti ricerche dell'Università del Salento. In L. Fozzati (A c. Di), *Relitti: Che fare? Archeologia subacquea del mare Adriatico e del mare Ionio*. (pagg. 57–80). Ariccia: Aracne.
2. Auriemma, R., Calantropio, A., Chiabrando, F., Coluccia, L., Rugge, M., D'Ambrosio, P., Buccolieri, M., & Picciolo, A. (2021). Underwater archaeological surveys in Salento waters: Results and methods. In B. Merkel & M. Hoyer, *FOG special volume 58* (pagg.96–105).
3. Calantropio, A., Chiabrando, F., & Auriemma, R. (2021). Photogrammetric Underwater And UAS Surveys Of Archaeological Sites: The Case Study Of The Roman Shipwreck Of Torre Santa Sabina. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 643–650. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-643-2021>

4. Calantropio, A.; Chiabrande, F. Underwater Cultural Heritage Documentation Using Photogrammetry. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 413. <https://doi.org/10.3390/jmse12030413>
5. Secci, M., Beltrame, C., Manfio, S., & Guerra, F. (2019). Virtual reality in maritime archaeology legacy data for a virtual diving on the shipwreck of the Mercurio (1812). *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2019.05.002>
6. https://pro.sony/en_NO/products/installable-cameras/ilx-lr1
7. Menna, F., Nocerino, E., Fassi, F., Remondino, F. (2016). Geometric and Optic Characterization of a Hemispherical Dome Port for Underwater Photogrammetry. *Sensors*, 16, 48. <https://doi.org/10.3390/s16010048>
8. She, M., Song, Y., Mohrmann, J., Köser, K. (2019). Adjustment and Calibration of Dome Port Camera Systems for Underwater Vision. In: Fink, G., Frintrop, S., Jiang, X. (eds) *Pattern Recognition. DAGM GCPR 2019. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 11824. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33676-9_6
9. She, M., Nakath, D., Song, Y., Köser, K. (2022). Refractive geometry for underwater domes, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 183, January 2022, Pages 525-540, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.006>.
10. <https://waterlinked.com/underwater-gps-g2>