

# TECNICHE IMAGING PER LA MODELLAZIONE 3D DELLA SUPERFICIE MARINA

## IMAGING METHODS FOR SEA SURFACE 3D MODELING

V. Barrile, V. Gelsomino, D. Lamari

Laboratorio di Geomatica, DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, 89123 loc. Feo di Vito, Reggio Calabria  
vincenzo.barrile@unirc.it, ing.gelsomino@gmail.com, antonio.lamari@gmail.com

**PAROLE CHIAVE:** Computer vision, fotogrammetria digitale, modellazione 3D, superficie marina, moto ondoso

**KEY WORDS:** Computer vision, digital photogrammetry, 3D modeling, sea surface, sea waves

### RIASSUNTO

Nell'ottica di una sperimentazione più ampia da condurre in collaborazione con il NOEL (*Natural Ocean Engineering Laboratory*) del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali (DICEAM) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, il laboratorio di Geomatica ha prodotto una prima ricostruzione di un modello metrico tridimensionale, tramite nuvola di punti, della superficie marina ad un istante fissato, utilizzando tecniche *imaging* "a basso costo". Le coppie di immagini digitali, acquisite in sincrono, sono state elaborate mediante *software* commerciale Agisoft PhotoScan.

La prova è stata condotta su uno specchio di mare prospiciente il lungomare di Reggio Calabria e ha permesso di estrapolare dal modello ottenuto dei valori di altezza d'onda compatibili con le condizioni meteomarine riscontrate in fase di ripresa. Al fine di validare ed analizzare i risultati conseguiti, il modello così realizzato è stato confrontato con un analogo modello ottenuto attraverso tecniche fotogrammetriche rigorose, basate sull'uso di tre videocamere, utilizzando schemi e metodologie già noti in letteratura ed algoritmi implementati in programmi "aperti". Nonostante i buoni risultati ottenuti con la tecnica "a basso costo", anche in termini di precisione, si rendono necessarie ulteriori migliorie combinando l'uso di più *software* (anche sviluppati in proprio) e ottimizzando la sincronizzazione delle immagini riprese. Inoltre, si sta lavorando alla realizzazione di un sistema completo in grado di modellizzare in continuo nel tempo la superficie marina oggetto di indagine.

### ABSTRACT

As part of a larger trial in collaboration with NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) of Civil, Energy, Environmental and Materials Engineering Department (DICEAM) of the Mediterranean University of Reggio Calabria, the Geomatics laboratory has produced a first reconstruction of a 3D metric model, by points cloud, of the sea surface at a fixed time, using "low cost" imaging methods. The pairs of digital images, taken synchronously, have been processed using the commercial software Agisoft PhotoScan. The test was conducted on a stretch of sea facing the promenade of Reggio Calabria and it has obtained wave height values compatible with the weather and sea conditions encountered during shooting. In order to validate and analyse the results, the model was compared with another model, obtained by rigorous photogrammetric techniques using three camcorders, methods already known in the literature and algorithms in open software. In spite of good results of "low cost" method, in accuracy values too, further improvements are necessary by combining the use of more software (also developed in-house) and optimising the synchronization of the shots. Moreover, laboratory team is working on a system capable of time-continuous sea surface 3D modeling.

### 1. INTRODUZIONE

Il mare, occupando la maggior parte della superficie del pianeta, rappresenta una risorsa di notevole importanza per l'umanità. Fondamentale risulta la stima dei parametri che caratterizzano la superficie marina, poiché la conoscenza dei parametri caratteristici del moto ondoso precede qualsiasi studio scientifico o progettazione di opera ingegneristica in mare.

L'elevazione della superficie marina dovuta al passaggio di un'onda è, usualmente, misurata *in situ* mediante l'utilizzo di strumentazioni. Esse possono galleggiare sulla superficie libera (boe ondometriche), o attraversare verticalmente la superficie del mare (*wave staffs* calate da piattaforma *offshore*) o essere posizionate sul fondo (sensori acustici e sensori di pressione). Le misure ottenute da tali strumenti sono puntuali e continue nel tempo (Holthuijsen, 2007).

Negli ultimi anni sono state introdotte tecniche di *remote sensing*, le quali permettono di ottenere informazioni sul moto ondoso

senza alcuna interferenza con l'oggetto di studio (Lawrence et al., 2012).

Le difficoltà relative all'utilizzo di strumentazioni *in situ* in un ambiente marino altamente aggressivo possono essere ampiamente evitate attraverso l'uso di tecniche "a distanza" ovvero tramite telerilevamento. Tali tecniche hanno il vantaggio di fornire una distribuzione spaziale delle misurazioni relative al moto, inoltre esse non sono intrusive in quanto non a contatto con il campo di moto ondoso. Generalmente queste strumentazioni sono poste al di sopra della superficie del mare e disposte su strutture ferme o in movimento, come per esempio una piattaforma in mare, una torre di osservazione sulla costa, un aeromobile o un satellite. Il principio di base delle tecniche di telerilevamento è quello di captare e analizzare la radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie del mare attraverso dei sensori (De Vries et al., 2009).

Inoltre, esse permettono di evitare alcuni degli inconvenienti tipici delle misure *on site* del moto ondoso (Benetazzo, 2006), quali:

- l'aggressività dell'ambiente marino;
- la difficoltà di alimentazione elettrica degli strumenti;
- l'impossibilità di ottenere una misura in condizioni meteorologiche fortemente sfavorevoli.

Tra le tecniche di misure ondometriche a distanza da piattaforma su terraferma si annoverano i radar in banda X e in banda HF, mentre da satellite il SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e l'altimetro radar (Bourdier et al., 2014).

## 2. STATO DELL'ARTE

Nel campo del rilievo e delle misurazioni del moto ondoso, negli ultimi anni, si stanno affacciando nuove tecniche, solitamente appartenenti alla geomatica. Le tecniche basate su metodologie *imaging*, come la fotogrammetria digitale e la *computer vision*, vengono proficuamente sperimentate giorno dopo giorno e rappresentano una sfida per la ricerca in ambito marino e oceanografico (Benetazzo et al., 2012).

Fotografare il mare per osservare e ritrarre le onde del mare può sembrare una banalità, tuttavia dietro questa semplice azione si nasconde una grande potenzialità. Infatti, mediante delle immagini digitali è possibile riprodurre un modello tridimensionale della superficie libera del mare (Benetazzo, 2006). A partire da due immagini (stereofotografia), le quali devono essere necessariamente sincronizzate, data l'eccessiva dinamicità della superficie marina, si può realizzare una rappresentazione, in quel fissato istante di scatto, dell'elevazione d'onda marina (modello spaziale) (Hatzopoulos et al., 2012). Utilizzando, invece, una sequenza di immagini scattate ad istanti successivi è possibile analizzare e modellizzare il movimento della superficie marina nel tempo (modello spazio-temporale) (Benetazzo, 2006).

Il problema principale di questa tecnica è legato particolarmente all'individuazione dei punti omologhi necessari per poter costruire e restituire un modello attendibile (Santel et al., 2002). Un primo esperimento di misura del moto ondoso mediante una coppia di macchine fotografiche montate su un'imbarcazione è stato effettuato nel 1939 da Schumacher (Holthuijsen, 1983). In seguito, col progetto SWOP (*Stereo Wave Observation Project*), si è sperimentata la possibilità di ottenere informazioni sulla superficie marina tramite misure aerofotogrammetriche realizzate nella seconda metà degli anni '50 per conto del Servizio Idrografico Nazionale degli Stati Uniti d'America nel (Coté et al., 1960).

Grazie agli sviluppi tecnologici, le tecniche fotogrammetriche per lo studio del moto ondoso hanno conosciuto un nuovo slancio negli anni '70 e '80. Significativi in questo periodo sono stati gli studi condotti da Holthuijsen nel 1983 sempre sulle riprese aerofotogrammetriche della superficie marina.

Negli anni recenti diversi sono stati gli esperimenti effettuati in questo ambito. Tra questi i più degni di nota sono:

- il progetto WAVESCAN sviluppato da Santel et al. nel 2004. L'obiettivo di questo progetto è l'acquisizione fotogrammetrica e la successiva modellazione delle onde marine sulla base di sequenze di immagini digitali, ottenute mediante l'utilizzo di quattro videocamere digitali montate sulla costa (Santel et al., 2004).
- il sistema WASS (*Wave Acquisition Stereo System*), introdotto da Benetazzo nel 2006 e portato avanti con la collaborazione di Fedele, Gallego e Yezzi, si basa sull'uso di due videocamere digitali operanti nella banda della radiazione visibile, che sfruttando i principi della stereofotogrammetria computazionale permettono di ricostruire l'istantanea 3D dell'elevazione della superficie del mare. Tali misure ripetute in continuo nel tempo costituiscono un dato significativo per determinare gli stati di

mare. Il processo di elaborazione delle immagini acquisite si basa sulle formulazioni della geometria epipolare e sugli algoritmi tipici della *computer vision*.

- il sistema ATSS (*Automatic Trinocular Stereo Imaging System*), sviluppato da Wanek e Wu nel 2006, è costituito da tre videocamere montate su un supporto metallico, che acquisiscono in continuo i movimenti della superficie marina. Recentemente è stato sviluppato un sistema VWG (*Virtual Wave Gauge*), il quale cerca di superare il problema legato all'individuazione di punti omologhi nelle immagini mediante la focalizzazione del sistema soltanto su alcuni punti dell'immagine, dei quali verrà ottenuta una serie temporale dell'elevazione d'onda.

Il presente lavoro riprende i tentativi portati avanti da Hatzopoulos et al. nel 2012 per la ricostruzione di modelli 3D della superficie marina utilizzando tecnologia e *software* commerciali *low cost* applicati in geomatica e analizzare la qualità dei risultati conseguiti.

## 3. SPERIMENTAZIONE CONDOTTA

### 3.1 Inquadramento geografico

La sperimentazione ha avuto luogo nel tratto di costa prospiciente il prolungamento sud del Lungomare "Italo Falcomatà" di Reggio Calabria, precisamente nella zona cosiddetta Castelnuovo (Fig. 1). Le motivazioni che hanno portato alla scelta di questa area sono state:

- sfruttare la posizione di rilievo rispetto al livello del mare per ottenere una migliore inquadratura dello specchio di mare oggetto del rilievo;
- la presenza della scogliera e, quindi, la possibilità di inquadrare nella scena oggetti fissi tali da poter essere utilizzati come *target* nell'elaborazione delle immagini e come *markers* per la messa in scala del modello, nonché la presenza nello specchio di mare di aste metalliche utilizzate come supporto per strumentazione profilometrica (trasduttori di pressione).



Figura 1. Vista aerea ravvicinata dell'area interessata

### 3.2 Acquisizione delle immagini digitali

Si è proceduto all'acquisizione di immagini digitali mediante l'utilizzo di una coppia di fotocamere digitali compatte a basso costo Nikon COOLPIX S2600. La coppia di fotocamere è stata montata su due distinti treppiedi ad uso fotografico posti in sommità della scogliera. Le due fotocamere digitali, disposte ad una distanza pari a 50 cm, sono state puntate verso lo specchio di mare oggetto di rilievo (Fig. 2).



Figura 2. Set-up utilizzato per la sperimentazione

Poiché ai fini della ricostruzione del modello tridimensionale è necessario che i fotogrammi siano sovrapponibili, risulta essere importante l'orientamento delle due camere (Fig. 3). Si è scelto dunque di operare con gli assi di ripresa paralleli ed ortogonali alla base.

Le due fotocamere compatte sono state, entrambe, collegate mediante cavi USB a un *notebook* ASUS X52J, in modo tale da attuare una gestione sincronizzata e multipla dei dispositivi attraverso l'utilizzo del *software open source* digiCamControl.



Figura 3. Coppia di fotogrammi acquisiti (sx e dx)

Al fine di rendere omogenei i valori di esposizione degli scatti sono state stabilite delle impostazioni manuali (ottimali per le condizioni di luminosità e del contesto) comuni ad entrambe le fotocamere.

### 3.3 Ricostruzione del modello

La modellazione 3D della superficie marina è stata effettuata mediante opportuno software di elaborazione, che sfrutta le teorie della stereofotogrammetria digitale e gli algoritmi della *computer vision*. I pregi di questa tecnica, come noto, risultano essere:

- costi contenuti;
- l'automaticità e l'immediatezza con cui è possibile ottenere un risultato preciso e utilizzabile anche per ulteriori elaborazioni e processi di analisi.

Il *software* usato è PhotoScan nella versione Professional 1.2.4, sviluppato dalla casa Agisoft LLC.

Per l'elaborazione delle immagini è stata utilizzata una *workstation* HP Z800.

La procedura di trasformazione computerizzata da fotogrammi a modello 3D avviene secondo un ordine prestabilito in diverse fasi.

La prima fase è quella di allineamento delle immagini e della costruzione della nuvola di punti sparsa (*points cloud base*). In questo *step* vengono individuati dal *software* i punti in comune ad entrambi i fotogrammi mediante gli algoritmi di *image matching*. Il risultato è una visione complessiva di tutti i punti di ripresa posizionati lungo i tre assi cartesiani (sistema di riferimento locale) e i punti che costituiscono la nuvola di punti sparsa (Tab. 1 e Fig. 4).

La costruzione della nuvola di punti densa (*dense points cloud*) rappresenta la seconda fase di elaborazione, in cui partendo dalla

nuvola di punti rada si ottiene una nuvola di punti più densa e dettagliata (Tab. 2 e Figure 5 e 6).

Immagini digitali	2
Punti di ripresa	2
Punti ottenuti ( <i>tie points</i> )	193
Durata elaborazione	60 secondi

Tabella 1. Dati relativi alla fase di allineamento delle foto

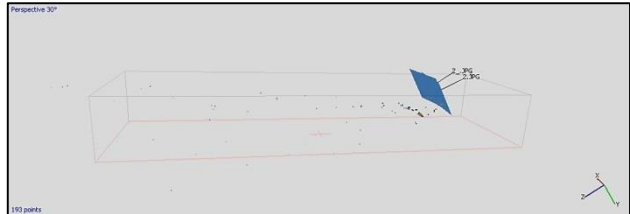


Figura 4. Nuvola di punti rada e punti di ripresa

Immagini digitali	2
Punti di ripresa	2
Livello di qualità	Alta
Livello di filtraggio	Moderato
Punti ottenuti	696.057
Durata elaborazione	12 minuti

Tabella 2. Dati sulla fase di costruzione della nuvola densa



Figura 5. Nuvola di punti densa

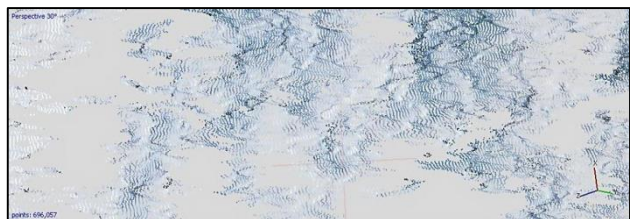


Figura 6. Particolare della nuvola di punti densa

La realizzazione della *mesh* permette di ottenere una maglia poligonale della superficie marina (Tab. 3 e Fig. 7).

La costruzione della *texture* è l'ultimo passaggio che permette di "rivestire" la maglia poligonale generata nella fase precedente utilizzando i dati di colore delle immagini caricate. La *texture* è, infatti, un insieme di *patch* che, applicate al modello a *mesh* danno un aspetto fotorealistico (Tab. 4 e Figure 8 e 9).

Immagini digitali	2
Punti di ripresa	2
Dato di partenza	Nuvola densa
Facce ottenute	179.999
Vertici	93.812
Durata elaborazione	15 minuti

Tabella 3. Dati relativi alla fase di costruzione della *mesh*

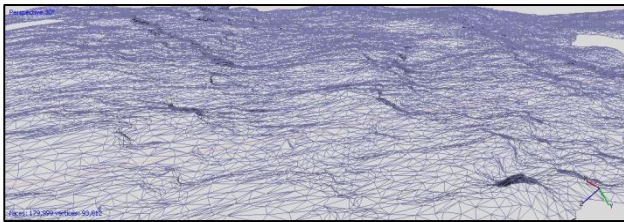


Figura 7. Particolare della maglia poligonale

Immagini digitali	2
Punti di ripresa	2
Facce	179.999
Vertici	93.812
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic (default)
Correzione dei colori	Abilitata
Durata elaborazione	12 minuti

Tabella 4. Dati relativi alla fase di costruzione della texture

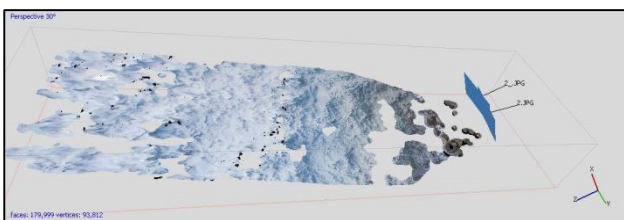


Figura 8. Texture ottenuta con punti di ripresa



Figura 9. Particolare della texture

### 3.4 Scalatura del modello

Il modello 3D texturizzato ottenuto è stato successivamente scalato e georeferenziato utilizzando i dati rilevati durante la campagna di ripresa. Dopo aver effettuato gli scatti sono state rilevate delle distanze visibili su entrambi i fotogrammi. Il rilievo è stato eseguito mediante l'uso di distanziometro laser Leica Disto A8 e ha permesso di istituire, sui fotogrammi e sul modello, dei punti detti *markers*, per la scalatura del modello (Fig. 10).

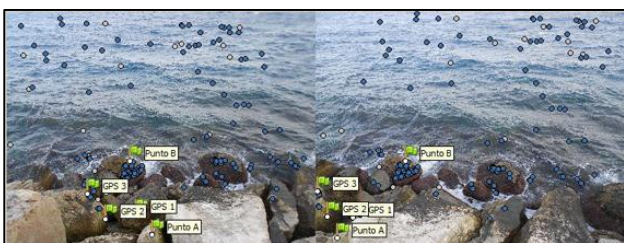


Figura 10. Punti di rilievo visibili sui fotogrammi

La georeferenziazione, invece, è stata effettuata mediante rilievo topografico con rover Leica Viva GNSS GS15 in modalità RTK individuando 3 punti sulla scogliera e 3 punti noti relativi alla posizione delle aste profilometriche installate sul fondale e affioranti sul livello del mare. I 6 punti utilizzati per la georeferenziazione si trovano ad una distanza media dell'ordine

del metro e la loro disposizione risulta essere sufficiente per un'analisi qualitativa dei risultati prodotti dallo studio in oggetto. Tuttavia, un passo successivo della ricerca sarà quello di utilizzare più punti efficacemente disposti e georiferiti ai fini della ripresa dello specchio di mare indagato, oltre all'utilizzo di una struttura metallica su cui montare i dispositivi di ripresa su punti noti a priori.

### 3.5 Analisi sul modello realizzato

Effettuando delle misurazioni sul modello metrico in CAD 2D, si è riscontrato che lo specchio di mare indagato presenta delle dimensioni di 11x35 m (Fig. 11). Quindi l'estensione della superficie marina modellizzata è pari a circa 380 m<sup>2</sup>. Inoltre, sezionando ortogonalmente il modello, è stato ottenuto il profilo dell'elevazione della superficie libera fissata all'istante dello scatto, avente come quota di riferimento locale la linea di battigia. Dal profilo è stato possibile riscontrare un valore dell'altezza d'onda più alta pari a circa 20 cm, misurazione compatibile con i dati di vento registrati nel giorno di ripresa fotografica (Fig. 12).

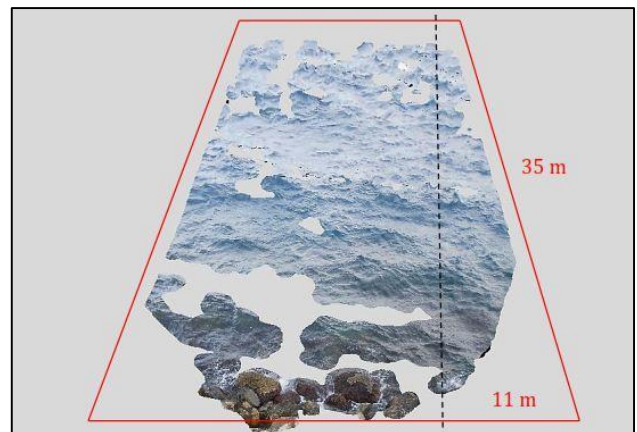


Figura 11. Estensione specchio di mare modellizzato



Figura 12. Profilo dell'elevazione d'onda  $\eta$

## 4. CONFRONTO DEI RISULTATI

### 4.1 Metodologia fotogrammetrica rigorosa

Al fine di validare, in termini di precisione e accuratezza dei risultati, quanto ottenuto nella sperimentazione condotta, mediante l'uso della coppia di fotocamere digitali e del software commerciale Agisoft PhotoScan (modello a "basso costo"), è stato realizzato un modello tridimensionale metrico della superficie marina, nella stessa area ed allo stesso istante, sperimentando l'utilizzo di tre videocamere digitali a basso costo resistenti alle intemperie NILOX Mini Action Cam. I suddetti dispositivi sono stati disposti triangolarmente, come rappresentato in Figura 13, su struttura metallica a tal fine creata tutti alla stessa quota e a distanze eguali pari a 1 metro e anch'essi gestiti in remoto dallo stesso notebook utilizzato per la prima prova. La contemporaneità tra i due sistemi di scatto è stata realizzata mediante un trigger opportunamente programmato. Tale metodologia di acquisizione ed elaborazione, utilizzando i tre punti di presa, risulta essere più performante ed efficiente in termini di stima dei principali parametri di orientamento fotogrammetrico (Pozzoli, Mussio, 2003a).

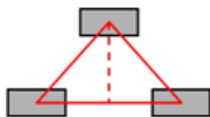


Figura 13. Schema di disposizione dei dispositivi di ripresa

A tal proposito, sono stati acquisiti una serie di fotogrammi sincroni e successivamente si è proceduto al processamento dei dati mediante l'utilizzo di *software* "aperti" (realizzati in ambiente Fortran e MATLAB) e già noti in letteratura (Pozzoli, Mussio, Scaioni, 2004). La metodologia adottata ha permesso di ricavare i parametri per l'orientamento relativo e assoluto delle immagini riprese in modo automatico. In particolare, vengono stimati i valori preliminari per l'orientamento relativo simmetrico (risolvendo un elevato numero di equazioni lineari ed esplorando le possibili configurazioni spaziali) ed i parametri per l'orientamento (Fig. 14) assoluto attraverso una semplice sostituzione di variabili, tale da poter trasformare il problema da non lineare a lineare (Pozzoli, Mussio, 2003b).

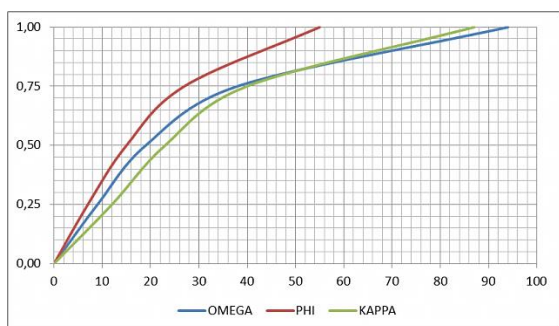


Figura 14. Risultati dell'orientamento assoluto relativi alla tecnica fotogrammetrica rigorosa

#### 4.2 Confronto tra i due modelli

Il modello ottenuto mediante la metodologia rigorosa fotogrammetrica con tre videocamere (Fig. 15) è stato confrontato con il modello ottenuto mediante tecnica speditiva a "basso costo" *imaging* da *computer vision* con due fotocamere (Fig. 11), riscontrando in termini di accuratezza, stima dei principali parametri di orientamento fotogrammetrico, precisione dei risultati una sostanziale comparazione delle due tecniche di ricostruzione dei modelli tridimensionali. A tal proposito si osservi la Tab. 5 relativa ai confronti tra le due tecniche in termine di precisioni ottenute fissando dei *target* posizionati sugli elementi omologhi, quali 3 punti sugli spigoli della scogliera 2 punti sulle aste prospicienti la superficie marina.

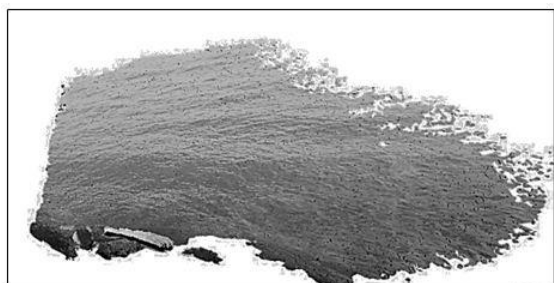


Figura 15. Modello 3D ottenuto con tecnica fotogrammetrica rigorosa

Punto	1	2	3	4	5
Scarto medio sulla misurazione di distanze 3D (cm)	5,2	7,1	1,3	2,8	3,2

Tabella 5. Confronto dei valori ottenuti dai due modelli

### 5. CONCLUSIONI

La sperimentazione compiuta ha dimostrato le potenzialità delle tecniche basate sull'uso di metodi fotogrammetrici "a basso costo" per il rilievo tridimensionale applicate nel campo del moto ondoso. Attraverso due fotografie, ottenute con metodologia tipica della stereofotogrammetria ed elaborate con algoritmi della *computer vision*, è stato possibile ottenere un modello 3D altamente dettagliato della superficie marina per un'estensione significativa dello specchio di mare oggetto d'indagine, grazie ad una strumentazione dai costi contenuti e ad una elaborazione semplice e rapida tipicamente propria delle tecniche *image based* mediante *computer vision*.

Proprio la possibilità di ottenere una modellazione della superficie marina non solo spaziale bensì spazio-temporale, pone questa tecnica fotogrammetrica come promettente e valida alternativa alle tradizionali tecniche di misure ondometriche, da cui si ottengono solo dati puntuali interferendo con l'oggetto della misurazione. Tuttavia, l'implementazione di questa tecnica innovativa, comporta diversi accorgimenti quali:

- l'utilizzo combinato di più fotocamere per aumentare la capacità di ripresa;
- l'installazione di dispositivi elettronici (Arduino) per una sincronizzazione ottimale dello scatto;
- l'utilizzo di videocamere in luogo di fotocamere per ottenere una ripresa continua nel tempo del moto ondoso e quindi una sua più completa ricostruzione temporale.

Il laboratorio di Geomatica, con la collaborazione del laboratorio NOEL, sta portando avanti, proprio in tal senso, una sperimentazione congiunta volta alla modellazione tridimensionale spazio-temporale della superficie marina, attraverso l'implementazione di appositi algoritmi e la realizzazione degli accorgimenti di cui sopra, validandone i risultati ottenuti mediante confronto con i dati acquisiti da strumenti di misura ondometrica tradizionali disposti nello stesso specchio di mare oggetto d'indagine.

### 6. BIBLIOGRAFIA

Benetazzo A., 2006, Measurements of short water waves using stereo matched image sequences, *Coastal Engineering* 53

Benetazzo A., Fedele F., Gallego G., Shih P-C., Yezzi A., 2012, Offshore stereo measurements of gravity waves, *Coastal Engineering*, 64, pp. 127-138

Bourdier S., Dampney K., Fernandez H., Lopez G., Richon J., 2014, D4.05 Non-Intrusive Wave Field Measurement, Report by Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), European Marine Energy Centre (EMEC), Leibniz Universität Hannover, Plymouth University, and University of Edinburgh. pp 53.

Coté L.J., Davis J.O., Marks W., McGough R.J., Mehr E., Pierson W.J., Ropek J.F., Stephenson G., Vetter R.C., 1960, The directional spectrum of a wind-generated sea ad determined from data obtained by the Stereo Wave Observation Project, *Meteorological Papers*, 2, No. 6, New York University, College of Engineering

De Vries S., Hill D., de Schipper M.A., Stive M.J.F., 2009, Using stereo photogrammetry to measure coastal waves, *Journal of Coastal Research* pp. 1484-1488

Hatzopoulos J.N., Demetrios M., 2012, Close range photogrammetry mapping of sea waves for better harbor design, *ASPRS Annual Conference Sacramento*, California, 19-23 March 2012

Holthuijsen L.H., 1983, Stereophotography of ocean waves, *Applied Ocean Research*, Vol. 5 Issue 4 pp. 204-209

Holthuijsen L.H., 2007, *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge University Press, Cambridge UK

Lawrence J., Holmes B., Bryden I., Magagna D., Torre-Enciso Y., Rousset J., Smith H., Paul M., Margheritini L., Candido J., 2012, D2.1 Wave Instrumentation Database, Report by Aalborg University, Ecole Central de Nantes (ECN), Ente Vasco de la Energía (EVE), European Marine Energy Centre (EMEC), Leibniz Universität Hannover, Plymouth University, University College Cork, University of Edinburgh, University of Exeter, and Wavec - Offshore Renewables. pp 60.

Pozzoli A., Mussio L., 2003a, Quickly solutions particularly in close range photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, part 5W12, pp. 273-278

Pozzoli A., Mussio L., 2003b, Non-linear problems of analytical photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, part 6W11

Pozzoli A., Mussio L., Scaioni M., 2004, A solution for the general case of three-image orientation, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXV, part B3, pp. 992-997

Santel, F., Heipke, C., Konnecke, S., & Wegmann, H., 2002, Image sequence matching for the determination of three-dimensional wave surfaces. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(5), pp. 596-600.

Santel F., Linder, W, Heipke, C., 2004. Stereoscopic 3D-image sequence analysis of sea surfaces. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part 5, pp. 708-712.

Wanek J., Wu C., 2006, Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements, *Ocean Engineering* 33 (5-6) pp. 723-747