

277 Stato dell'arte della saldatura con processo a filo continuo freddo con protezione gassosa in arco pulsato, (traduzione a cura di M. Murgia) / *An overview on the cold wire pulsed gas metal arc welding*, R. A. Ribeiro et al. Questo contributo nasce all'interno della Commission XII dell'IIW - Arc Welding Processes and Production Systems, dalla quale è stato inoltre raccomandato per la pubblicazione, e descrive un'attività sperimentale condotta per caratterizzare l'applicazione del processo P-GMAW, impiegato con forma d'onda controllata. In questo processo, la corrente è pulsata e consente una riduzione dell'apporto termico, quindi delle deformazioni e delle tensioni residue. In particolare, gli autori hanno analizzato l'applicazione del processo con protezione gassosa e pulsato a filo freddo (CW-P-GMAW), allo scopo di incrementare le prestazioni del P-GMAW con un filo freddo (non attraversato da corrente), alimentato nel bagno di saldatura. In questa indagine è stata analizzata la fattibilità del processo e studiata l'influenza dell'alimentazione del filo freddo sui parametri della pulsazione per diversi rapporti tra corrente di base e di picco, utilizzando riprese ad alta velocità, con campionamento sincronizzato di corrente e tensione; allo stesso modo, sono state realizzate sezioni metallografiche trasversali per caratterizzare adeguatamente i risultati del processo.

305 Caratterizzazione sperimentale del procedimento Tandem MIG Hot Wire® per riporti in lega di nichel ad alto contenuto di rame, A. Volpi et al. Durante le ultime Giornate Nazionali di Saldatura è stata presentata la memoria relativa a questo contributo, nato da una collaborazione tra Alfa Laval OLM, TSM Srl e Lincoln Electric Italia. Come noto, le leghe Ni-Cu sono impiegate in vari settori industriali: impianti off-shore, navale, chimico e petrolchimico. Esse presentano in generale una buona resistenza alla corrosione in diversi ambienti e vengono impiegate sia come materiale base, sia come riporti di saldatura lato processo. Nella memoria sono riassunti i risultati ottenuti e verificati su riporti di saldatura eseguiti con il processo Tandem Mig HotWire™ della Lincoln Electric; scopo dei test è stato illustrare la relazione tra specifiche variabili operative e le qualità chimiche del riporto. Tutte le prove condotte hanno, infatti, avuto l'obiettivo di verificare la connessione tra variazioni parametriche del processo e variazioni nel rapporto di diluizione.

321 Processo GTAW multipass e robotizzato per la realizzazione di componenti di turbomacchine, S. Alberini et al. Anche questa presentazione è stata esposta alle ultime Giornate Nazionali di Saldatura nell'ambito del Workshop dedicato alle tecnologie di giunzione. La continua necessità di ridurre i tempi ed i costi di produzione ha portato BHGE Nuovo Pignone a guardare all'automazione e/o robotizzazione del processo di saldatura GTAW, il quale - pur non essendo annoverato tra quelli a più tasso di deposito - è comunque in grado di realizzare giunti di una elevata qualità, quindi con costi di produzione complessivamente competitivi rispetto alla tecnologia manuale dello stesso processo manuale o rispetto a processi con tassi di deposito migliori. La sfida affrontata è stata rendere il processo sostenibile attraverso un rigoroso sviluppo del processo stesso e della sua qualifica, l'integrazione di soluzioni automatiche e robotizzate customizzate, controlli in process del percorso e della qualità del giunto e lo sviluppo di logiche di programmazione avanzate applicabili a percorsi non ripetitivi.

331 Fabbricazione, caratterizzazione ed analisi agli elementi finiti di cilindri in lega di alluminio 4043 prodotti con tecnologia additiva WAAM a filo freddo, (traduzione a cura di M. Murgia) / *Fabrication, characterisation, and finite element analysis of cold metal transfer-based wire and arc additive-manufactured aluminium alloy 4043 cylinder*, R. Pramod et al. Da tempo, ormai, la Commission I dell'IIW - Additive Manufacturing, Surfacing, and Thermal Cutting ha fatto proprio il tema della fabbricazione di semilavorati e componenti metallici mediante tecnologie additive, cui non mancano le affinità con il contesto della saldatura, in considerazione dei processi con i quali sono realizzate le tecnologie stesse. In particolare, l'impiego di tecnologie additive (AM) presenta vantaggi importanti in termini di libertà di progettazione, costo dei materiali e risparmio nei tempi di consegna [1, 2]. L'AM appare oggi come una potenziale alternativa ai convenzionali processi di lavorazione di tipo sottrattivo e le diverse tecniche AM possono consentire di realizzare geometrie complesse con vantaggi dovuti al risparmio di materie prime, utilizzando consumabili in forma di filo o in polvere, che vengono fusi utilizzando un fascio di elettroni, laser o processi ad arco. Questo articolo descrive la realizzazione di semilavorati cilindrici in lega di alluminio con tecnologia WAAM - produzione additiva a filo ed arco elettrico - e la caratterizzazione effettuata per comprovarne le principali proprietà meccaniche e metallurgiche.

Articoli e Rubriche

273

Editoriale

Digital twin, Internet of things e tecnologie 4.0: predire il futuro si può... e validarlo?

S. Morra

411

Notizie dal web

415

Dalle Aziende

421

Notiziario

Letteratura tecnica

Codici e Norme

Corsi e Manifestazioni tecniche

428

Elenco degli Inserzionisti



In copertina

Modello di pala di elica modulare per propulsione navale realizzato da IIS per il progetto coordinato da DETRA S.R.L. nell'ambito del Programma Operativo Regione Liguria, Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale 2014-2020, Azione 1.2.4: "Supporto alla realizzazione di progetti complessi di attività e di ricerca e sviluppo per le imprese aggregate ai poli di ricerca ed innovazione".

- Processo: PBF-LB (Powder Bed Fusion - Laser Beam).
- Impianto di fabbricazione: EOS M290.
- Materiale: acciaio legato inossidabile tipo AISI 316L.

This title is indexed by

Scopus®
Engineering Village

weldasearch
worldwide materials & joining database

353 Realizzazione di elementi di rinforzo della scocca per applicazioni automobilistiche con tecnologia additiva ad arco elettrico, (traduzione a cura di M. Murgia) / *Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering*, A. Josten e M. Höfemann. La produzione additiva basata sulla saldatura ad arco è una tecnologia produttiva ed economicamente interessante, che può essere considerata ormai una opzione matura ed affidabile. Tuttavia, sono probabilmente meno note le sue potenzialità nell'ambito dell'industria automobilistica, con particolare riferimento al rinforzo ed all'aumento della rigidità di componenti della carrozzeria. Questa tecnologia potrebbe infatti consentire di ottenere una maggiore rigidità flessionale, con un volume di materiale impiegato (e quindi un peso) relativamente più basso. Nello studio presente, è stata scelta la produzione additiva con arco elettrico a filo continuo (WAAM), di tipo avanzato, con un ridotto apporto termico. Il primo obiettivo è stato verificare la possibilità di generare una piastra di rinforzo su parti di carrozzeria zincate, per il rinforzo di lamiere sottili di acciaio; il secondo obiettivo è stato aumentare la rigidità flessionale delle lamiere depositando il metallo saldato secondo la geometria di una griglia. Questo metodo di produzione ed i risultati di questo studio si riferiscono all'ingegneria automobilistica, ma potrebbe essere impiegato per altre applicazioni.

369 Recenti sviluppi nell'ispezione da remoto di strutture navali, *Robotic inspection of ships: inherent challenges and assessment of their effectiveness, Ships and Offshore Structures*, L. Poggi et al. Questo articolo è stato recentemente pubblicato dall'International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering e si riferisce ad una attività condotta presso il DITEN della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Genova, da parte del gruppo coordinato dal prof. Cesare Rizzo. Esso nasce dagli sviluppi del Progetto ROBINS (ROBotics technology for INspection of Ships), un progetto collaborativo cofinanziato nell'ambito del bando del programma H2020 EU Research and Innovation, volto a colmare il divario tra l'attuale approccio alle ispezioni navali e la tecnologia robotica disponibile, sia dal punto di vista tecnologico che da quello normativo. Obiettivo principale del lavoro è stato evidenziare come le ispezioni navali siano attualmente svolte da esseri umani e come potrebbero essere migliorate utilizzando strumenti di tipo RAS - Robotica e Sistemi Autonomi, per quanto ad oggi non siano alternative ancora completamente autonome. In tale contesto, è stato costruito un centro di prova volto a valutare le capacità di RAS, oltre a fornire un ambiente adatto per il loro sviluppo, ed è ancora in fase di sviluppo insieme a protocolli di prova dedicati, in grado di valutare l'equivalenza tra ispezione umana e RAS della nave e delle strutture marine. Sono descritte le caratteristiche di una struttura di prova in cui è possibile testare la RAS e vengono presentati i protocolli di prova, mostrando come possono essere colmate le lacune tecnologiche e normative.

395 Il futuro della saldatura e dei processi affini secondo IIW, L. Costa e E. Sciacaluga. L'Istituto Internazionale della Saldatura (International Institute of Welding - IIW) è stato fondato nel secondo dopoguerra, nel 1948 da 13 Istituti e Associazioni Nazionali della Saldatura con l'obiettivo di "permettere lo scambio di conoscenze nel campo della saldatura". Dalla sua fondazione, sono stati sviluppati e messi a punto numerosi processi di saldatura e tecnologie affini. Come conseguenza anche l'IIW si è sviluppato, ampliando costantemente il numero dei suoi membri: ad oggi se ne registrano più di 50 nei 5 continenti. Anche il suo ambito di interesse si è sviluppato negli anni, fino ad includere i processi di saldatura applicati ai materiali polimerici (oltre a quelli metallici), le applicazioni nanometriche e di larga scala, gli aspetti legati alla progettazione, fabbricazione, riparazione, estensione della vita residua, la gestione della qualità, la formazione e la certificazione in saldatura e nelle tecnologie ad essa correlate. La comunità dell'IIW (costituita all'incirca da 2000 esperti) include le eccellenze scientifiche e tecnologiche del mondo della ricerca e delle istituzioni industriali e si riunisce almeno due volte all'anno per incontrarsi e poter discutere di nuovi argomenti di studio, sviluppare collaborazioni interdisciplinari, produrre libri, norme ISO, raccomandazioni, linee guida e documenti di "best practices". Questo articolo presenta e riassume le tendenze future nel campo della saldatura e delle tecnologie ad essa correlate.

3 2021

ANNO LXXII Maggio - Giugno 2021
Periodico Bimestrale

DIRETTORE RESPONSABILE

Dott. ing. Sergio Scanavino

REDATTORE CAPO

Dott. ing. Michele Murgia

michele.murgia@iis.it

REDAZIONE

Isabella Gallo

redazione.rivista@iis.it

PROGETTO GRAFICO E IMPAGINAZIONE

Isabella Gallo

ABBONAMENTI

rivistamarketing@iis.it

PUBBLICITÀ

Cinzia Presti

cinzia.presti@iis.it



Organo Ufficiale
dell'Istituto Italiano della Saldatura

Direzione - Redazione - Pubblicità:

Lungobisagno Istria, 15 - 16141 Genova

Tel.: (+39) 010 8341475 - Fax: (+39) 010 8367780

redazione.rivista@iis.it - www.iis.it



Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

Rivista Italiana della Saldatura

Abbonamento cartaceo annuale 2021:

Italia: € 110.00

Esteri: € 170.00

Un numero separato: € 26.00

Abbonamento elettronico annuale 2021: € 80.00

La Rivista viene inviata gratuitamente ai Soci dell'Istituto Italiano della Saldatura.

Registrazione al ROC n. 5042 - Tariffa regime

libero: "Poste Italiane SpA - Spedizione in

Abbonamento Postale 70%, DCB Genova"

Fine Stampa Maggio 2021

Aut. Trib. Genova 341 - 20.04.1955

Stampa: ALGRAPHY srl, Genova - www.algraphy.it



L'Istituto Italiano della Saldatura aderisce per i contenuti della propria Rivista alle Linee Guida emanate da COPE, Committee on Publication Ethics (<http://publicationethics.org>), con particolare riferimento ai contenuti degli articoli, alla pubblicazione di informazioni riservate o sensibili ed alla citazione delle fonti. La riproduzione degli articoli pubblicati è permessa purché ne sia citata la fonte, ne sia stata concessa l'autorizzazione da parte della Direzione della Rivista e sia trascorso un periodo non inferiore a tre mesi dalla data della pubblicazione. La collaborazione è aperta a tutti, Soci e non Soci, in Italia e all'estero. La Direzione della Rivista si riserva di accettare o meno, a suo insindacabile e privato giudizio, le inserzioni pubblicitarie. Ai sensi del GDPR (Reg. UE 679/2016), i dati personali dei destinatari della Rivista saranno oggetto di trattamento nel rispetto della riservatezza, dei diritti della persona e per finalità strettamente connesse e strumentali all'invio della pubblicazione e ad eventuali comunicazioni ad esse correlate.

una voce autorevole al servizio dell'industria per informare
con competenza specialistica e sciogliere il nodo della disinformazione tecnica



Deformazione è cronista
attenta di tutto ciò che
accade nel mondo della
lavorazione della lamiera



Applicazioni Laser è
l'unica rivista italiana
dedicata all'uso industriale
della tecnologia laser



Elemento Tubo è dedicata
alla lavorazione di tubi e
profilati e ne presenta gli usi
industriali più innovativi

Recenti sviluppi nell'ispezione da remoto di strutture navali*

Autori

- Laura Poggi, Tomaso Gaggero, Marco Gaiotti, Enrico Ravina, Cesare Mario Rizzo, DITEN, Università di Genova, Genova, Italy.

Riassunto ■ Abstract

In recent years robotics has become an important resource in engineering. Adoption of Robotics and Autonomous Systems (RAS) in activities related to ship inspections has obvious potential advantages, but also arises particular challenges, both from technical and legal viewpoints.

The ROBINS project (ROBOTics technology for INSpection of Ships) is a collaborative project co-funded within the H2020 EU Research and Innovation programme call, aimed at filling the gap between current ship inspections approach and available robotic technology, both from technological and regulatory point of view.

Main goal of the present work is to highlight how ship inspections are currently carried out by humans, how they could be improved using RAS, even if not completely autonomous for the time being, at least in selected operational scenarios and how the performances of RAS platforms can be tested to assess their effectiveness in carrying out surveys onboard. In such a framework, a testing facility aimed at assessing RAS' capabilities as well as providing suitable environment for their development has been built and it is still under development along with dedicated testing protocols, able to assess the equivalence between human and RAS inspection of ship and marine structures.

The features of a testing facility where RAS can be tested and the testing protocols are presented, showing how technological and regulatory gaps are filled.

Negli ultimi anni la robotica è diventata una risorsa importante nell'ingegneria. L'adozione della robotica e dei sistemi autonomi (RAS) nelle attività relative alle ispezioni di navi presenta evidenti vantaggi potenziali, ma pone anche

particolari sfide, sia dal punto di vista tecnico che giuridico. Il progetto ROBINS (ROBOTics technology for INSpection of Ships) è un progetto collaborativo cofinanziato nell'ambito del bando del programma H2020 EU Research and Innovation, volto a colmare il divario tra l'attuale approccio alle ispezioni navali e la tecnologia robotica disponibile, sia dal punto di vista tecnologico che da quello normativo.

Obiettivo principale del presente lavoro è evidenziare come le ispezioni navali, attualmente svolte da esseri umani, potrebbero essere migliorate utilizzando tecnologie RAS, sebbene non completamente autonome per il momento ed almeno in particolari scenari operativi selezionati, e definire come le prestazioni delle piattaforme RAS possano essere testate per valutarne l'efficacia nello svolgimento di indagini a bordo.

In tale contesto, sono state costruite attrezzature di prova volte a valutare le capacità di tecnologie RAS, che sono ancora in fase di evoluzione, oltre a fornire un ambiente adatto per il loro sviluppo insieme a protocolli di prova dedicati, in grado di valutare l'equivalenza tra la tradizionale ispezione umana e quella eseguita con tecnologie RAS di navi e di strutture marine.

Nell'articolo sono descritte le caratteristiche delle attrezzature di prova in cui è possibile testare tecnologie RAS oltre a descrivere i protocolli di prova, mostrando come possono essere colmate le lacune tecnologiche e normative.

IIW Thesaurus Keywords:

Nondestructive testing; shipbuilding; ships; standards; real time operations; in service operations.

(*) Laura Poggi, Tomaso Gaggero, Marco Gaiotti, Enrico Ravina & Cesare Mario Rizzo (2020): Robotic inspection of ships: inherent challenges and assessment of their effectiveness, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 12 (2020) 881-89. Contents lists available at ScienceDirect, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering © 2020 Society of Naval Architects of Korea. Production and hosting by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Surveys on board ships are generally carried out by a number of bodies such as flag states, port state authorities, classification societies, P&I clubs, insurance companies and cargo owners. On average, the frequency of inspection can be estimated to be 6 inspections per year for dry bulk carriers, 11 for tankers and even more for passenger ships with at least 50 h per year spent aboard to carry out inspections, (Knapp and Franses, 2006). Coming to costs, it was estimated, and confirmed by recent private communications of authors with a few shipping stakeholders, that for bulk carriers costs are around 25 k\$ per year and around 50 k\$ per year for tankers, (Knapp and Franses, 2006). Nowadays, apart from rare cases, inspections are carried out by human surveyors. In general, surveyors reach and inspect every part of the ship, also including very dangerous and potentially lethal areas. For this reason, the International Association of Classification Societies (IACS), that gathers the twelve largest ship classification societies worldwide covering more than 90% of the world's cargo carrying tonnage, issued a series of documents containing recommendations and guidelines aimed at minimising risks for surveyors and at complying with minimum safety requirements. Recommendations range from the provisions to safely enter into confined spaces, (Procedural Requirement No. 37, 2013), (No, 2017), to the safe use of rafts and boats to navigate in tanks (No, 2009), to the safe use of portable ladders to reach high locations, (No, 2002), (No), to guidelines for working in height, to boat transfer safe practice, (No, 2014), to recommendations for safe precautions to survey pressurised systems, (No, 2015a), to generic recommendations to assess the safety of the workplace (No, 2015b). All the above cited documents highlight the complexity of on board surveys suggesting that each survey must be anticipated by a series of preventive operations such as cleaning, ventilating, lighting, temporary set-up of structures, such as ladders and cherry pickers, to allow the surveyor safely entering spaces and reaching significant heights and inaccessible zones (see e.g. Fig. 1). This reflects into an increase in risks, time and costs of inspection.

In order to reduce time, costs and risks related to on board inspections, most of classification societies are exploring the possibility of using Robotics and Autonomous Systems (RAS) to carry out remote inspections, (Caldwell, 2017), (Huang et al., 2017), (Rizzo et al., 2007). IACS has recently published an updated version of its Recommendation 42, (Rec 42 Guidelines f, 2016), where the conditions and procedures for the use of remote techniques for inspection of ships are addressed, and a non-exhaustive list of possible techniques that can be used to the purpose is given. RAS suitable for ship surveys can range from aerial drones for visual inspections to crawlers in direct contact with the structure, intended to carry out thickness gauging and non-destructive testing. Another possible grouping of RAS can be based on the ability of carrying flight operations in enclosed spaces, where impacts with structures are highly probable, such as

1. Introduzione

Le indagini a bordo delle navi sono generalmente condotte da un certo numero di organismi quali stati di bandiera, autorità dello stato di approdo, società di classifica, P&I club, compagnie di assicurazione e proprietari delle navi. In media, la frequenza delle ispezioni può essere stimata in 6 ispezioni all'anno per le portarinfuse, 11 per le navi cisterna e ancora di più per le navi passeggeri con almeno 50 ore all'anno trascorse a bordo per effettuare le ispezioni, (Knapp e Franses, 2006). Per quanto riguarda i costi, è stato stimato e confermato da recenti comunicazioni private degli autori con stakeholder dell'industria dello shipping, che per le portarinfuse i costi sono di circa 25 k\$ all'anno e di circa 50 k\$ all'anno per le petroliere, (Knapp e Franses, 2006). Oggigiorno, salvo rari casi, le ispezioni vengono effettuate da ispettori umani. In generale, gli ispettori raggiungono e ispezionano ogni parte della nave, comprese aree molto pericolose per la sicurezza e potenzialmente letali. Per questo motivo, l'International Association of Classification Societies (IACS), che riunisce le dodici più grandi società di classifica di navi a livello mondiale che coprono oltre il 90% del tonnellaggio mondiale di navi mercantili, ha emesso una serie di documenti contenenti raccomandazioni e linee guida volte a ridurre al minimo i rischi per i surveyor e al rispetto dei requisiti minimi di sicurezza. Le raccomandazioni vanno dalle disposizioni per accedere in sicurezza in spazi confinati, (IACS Procedural Requirement No. 37, 2013), all'uso sicuro di battellini in cisterne parzialmente riempite (IACS Recommendation No. 39, 2009), all'uso sicuro di scale portatili per raggiungere posizioni elevate, (IACS Recommendation No. 78, 2002), alle linee guida per il lavoro in altezza, alla pratica sicura del trasferimento in barca, (IACS Recommendation No. 134, 2014), alle raccomandazioni di sicurezza per l'ispezione di recipienti in pressione (IACS Recommendation No. 140, 2015a), a raccomandazioni generiche per valutare la sicurezza sul lavoro (IACS, No. 141, Recommendation, 2015b). Tutti i documenti sopra citati evidenziano la complessità dei rilievi a bordo, suggerendo che ogni rilievo deve essere anticipato da una serie di operazioni preventive quali pulitura, ventilazione, illuminazione, allestimento temporaneo di strutture, quali scale e cestelli aerei, per consentire al surveyor di accedere in sicurezza agli spazi e raggiungere altezze significative e zone inaccessibili (vedi per esempio Figura 1). Ciò si riflette in un aumento dei rischi, dei tempi e dei costi di ispezione.

Al fine di ridurre tempi, costi e rischi relativi alle ispezioni a bordo, la maggior parte delle società di classifica sta esplorando la possibilità di utilizzare Robotics and Autonomous Systems (RAS) per effettuare ispezioni da remoto, (Caldwell, 2017), (Huang et al., 2017), (Rizzo et al., 2007). IACS ha recentemente pubblicato una versione aggiornata della sua Raccomandazione N. 42, (IACS Rec. No. 42, 2016), in cui vengono per la prima volta considerate le condizioni e le

ballast tanks, versus the ability of covering wide open areas such as cargo holds. RAS can either be used as autonomous information collectors without the presence of the surveyor, that is supposed to examine the data offline, or as a support to the surveyor who is generally looking at live images and streaming videos transmitted by the RAS, in order to instruct the pilot to approach zones requiring a closer inspection, according to the surveyor experience.

The American Bureau of Shipping (ABS) e.g. has been conducting field tests with Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for the survey of marine and offshore structures since 2015. The main outcomes of such experimental campaign were published in (Wen et al., 2018). Moreover, ABS has recently published some guidance notes on the use of unmanned aerial vehicles for structural surveys, (ABS, March 2018).

In general, the use of RAS is considered as an assistance, and acceptance of the inspection results will be to the satisfaction of the attending Surveyor. If the Surveyor is not satisfied with the inspection results provided by RAS, alternative or traditional survey techniques may be required. This means that the final decision about the applicability of remote techniques is demanded to the surveyor, on a case by case basis, according to his/her own experience.

DNV GL, the society born as the merging of the former Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd, announced that they performed their first production survey using UAVs in 2016 and their first offshore survey in 2017. Bureau Veritas, among other research projects, has joined RECOMMS, a joint investment project (JIP), to develop drones with the capability to inspect steel structures in enclosed spaces. Lloyd's Register (LR) has moved a little step forward by issuing an assessment standard for Remote Inspection Technique Systems (RITS), (Remote Inspection Tec, 2018), in which indications for the performance requirements, performance test and certification of RITS are present.

Recently, also Registro Italiano Navale (RINA) embedded

procedure per l'uso di tecniche di ispezione da remoto delle navi e nella quale è fornito un elenco, non esaustivo, di possibili tecniche che possono essere utilizzate allo scopo.

I RAS idonei per i rilievi in ambito navale possono spaziare dai droni aerei per ispezioni visive ai cingolati a diretto contatto con la struttura, destinati ad effettuare misure di spessore e controlli non distruttivi. Un altro possibile raggruppamento dei RAS può essere basato sulla capacità di condurre operazioni di volo in spazi chiusi, dove gli impatti con le strutture sono altamente probabili, come le cisterne di zavorra, rispetto alla capacità di coprire ampie aree aperte come le stive di carico. I RAS possono essere utilizzati sia come collettori di informazioni autonomi, senza la presenza del surveyor, il quale potrebbe poi esaminare i dati offline, oppure come supporto al surveyor che generalmente guarda le immagini e i video in streaming real-time trasmessi dai RAS, al fine di istruire il pilota ad avvicinarsi alle zone che richiedono un'ispezione più ravvicinata, secondo l'esperienza del surveyor.

L'American Bureau of Shipping (ABS) ha condotto ad esempio prove a bordo con veicoli aerei senza pilota (UAV) per l'ispezione di strutture marine e offshore fin dal 2015. I principali risultati di tale campagna sperimentale sono stati pubblicati in (Wen et al., 2018). Inoltre, ABS ha recentemente pubblicato alcune note sull'uso di veicoli aerei senza equipaggio (droni) per rilievi strutturali, (ABS, marzo 2018).

In generale, l'uso di tecnologie RAS è considerato come un supporto all'ispettore e l'accettazione dei risultati dell'ispezione è a discrezione del surveyor incaricato. Se il surveyor non è soddisfatto dei risultati dell'ispezione forniti da tecnologie RAS, possono essere richieste tecniche di indagine alternative o tradizionali. Ciò significa che la decisione finale sull'applicabilità delle tecniche a distanza è demandata al surveyor, caso per caso, in base alla propria esperienza.

Il DNV, la società nata dalla fusione dell'ex Det Norske



Figura 1 - Struttura tipica di una stiva di carico di una portarinfuse e di una cisterna di carico di una petroliera, ispezionata da ispettori umani utilizzando vari mezzi di accesso.

Figure 1 - Typical structure of a bulk carrier cargo hold and of an oil tanker cargo tank, being inspected by human surveyors using various means of access.

in their rules for the classification of ships a former guideline about RITS previously issued in 2017, (RINA, March 2018).

Worth to be mentioned are also pioneering EU funded collaborative research project such as INCASS (Inspection Capabilities for Enhanced Ship Safety) and MINOAS (Marine INspection rObotic Assistant System), involving several shipping stakeholders including classification societies, ship-owners and service suppliers, beside robotic systems developers.

The above overview highlights that the market is hardly pushing to introduce RAS-aided inspections in the inspection procedures, and that most of interested parties are actively operating in this direction, following different approaches. All of them agreed on the fact that technology is ready and promising but, to be successfully applicable in the shipping field, the information gained by machines should be at least at the same quality level as that normally obtained by a human surveyor and the assessment and certification of the achievement of such result is eventually demanded to the surveyor itself.

There is therefore the need to ascertain that RAS-aided inspections are at least as effective as human ones and such equivalency needs to be appropriately verified, possibly in a controlled environment where well defined and repeatable tests can be performed collecting all necessary information. To this aim, in 2018, the ROBINS project (ROBotics technology for INspection of Ships, www.robins-project.eu), a three-year EU collaborative project co-funded within the Horizon 2020 EU Research and Innovation program was launched. Final goal of the ROBINS project is to fill the gap, both from a technological and regulatory point of view, between current ship inspections and available robotic technology. In the present paper, in particular, the philosophy followed within the first period of the project to set up testing protocols and to conceive a testing facility for assessing RAS performances is presented. Outcomes of the trials carried out up to now are summarized as well.

2. Brief overview of current (human) survey practice

Considering the relatively good safety records of shipping, any approach to the definition of tests for the assessment and certification of RAS platforms performances in ship surveys should start from a comparison with current inspection practice by human surveys (Rec 76 Guidelines f, 2007). To this aim, it is important to analyse the scope of surveys. An approach to do this is to apply the "Four Ws and How" method, as presented in (Rizzo et al., 2008) and (Rizzo, 2011) by answering to five basic questions:

- Who?

For the time being, human surveyors but in some cases RAS have already been used in collaboration with surveyors.

- Why?

This question relates either to:

Veritas e Germanischer Lloyd, ha annunciato di aver eseguito la prima indagine utilizzando UAV nel 2016 e la prima indagine su strutture offshore nel 2017.

Il Bureau Veritas, tra gli altri progetti di ricerca, ha partecipato a RECOMMS, un progetto collaborativo industriale (IIP), per sviluppare droni in grado di ispezionare strutture in acciaio in spazi chiusi. Il Lloyd's Register (LR) ha compiuto un piccolo passo avanti pubblicando uno standard per la valutazione dei sistemi di ispezione remota (RITS), (LR, 2018), in cui sono presenti le indicazioni dei requisiti di prestazione, delle prove di verifica e per la certificazione dei RITS.

Recentemente, anche il Registro Italiano Navale (RINA) ha incorporato nelle proprie regole per la classificazione delle navi una precedente linea guida su RITS precedentemente emessa nel 2017, (RINA, marzo 2018).

Degni di nota sono anche i pionieristici progetti di ricerca finanziati dall'UE INCASS (Inspection Capabilities for Enhanced Ship Safety) e MINOAS (Marine INspection rObotic Assistant System), che coinvolsero diverse parti interessate del mondo dello shipping tra le quali società di classifica, armatori, fornitori di servizi e sviluppatori di sistemi robotici. La panoramica di cui sopra evidenzia come il mercato stia spingendo con forza per introdurre ispezioni assistite da tecnologie RAS nelle procedure di ispezione e che la maggior parte delle parti interessate stia operando attivamente in questa direzione, anche seguendo approcci diversi. Tutti hanno concordato sul fatto che la tecnologia è pronta e promettente ma, per essere applicabile con successo nel campo della costruzione navale, le informazioni ottenute dalle tecnologie RAS dovrebbero essere almeno allo stesso livello di qualità di quelle normalmente ottenute da un surveyor umano e la valutazione e l'attestazione del raggiungimento di tale risultato è eventualmente richiesta allo stesso surveyor.

Vi è quindi la necessità di accertare che le ispezioni assistite da tecnologie RAS siano efficaci almeno quanto quelle umane e tale equivalenza deve essere opportunamente verificata, possibilmente in un ambiente controllato dove possano essere eseguiti test ben definiti e ripetibili, raccogliendo tutte le informazioni necessarie. A tal fine, nel 2018, è stato lanciato il progetto ROBINS (ROBotics technology for INspection of Ships, www.robins-project.eu), un progetto collaborativo dell'UE di tre anni cofinanziato nell'ambito del programma di ricerca e innovazione Horizon 2020. L'obiettivo finale del progetto ROBINS è colmare il divario, sia dal punto di vista tecnologico che normativo, tra le attuali ispezioni navali e la tecnologia robotica disponibile. In questo articolo, in particolare, viene presentata la filosofia seguita nel primo periodo del progetto per impostare i protocolli di prova e concepire le attrezzature necessarie per valutare le prestazioni delle tecnologie RAS. Vengono inoltre riepilogati i risultati delle prove svolte fino ad oggi.

- For whom is actually carried out an inspection, i.e. implicitly setting the inspection aims, but also whether there are specific reasons for such an inspection.
- For which reasons inspection is carried out, e.g. whether it is a periodic scheduled inspection, or it is due after an accident or an imposed condition of class, or there are suspect areas where more frequent inspections are necessary.
- What?

It refers to the specific items to be checked on board. Since it is usually not possible to carry out an inspection of the entire structure of the ship or its machinery, there are rules and guidelines based on empirical experience indicating which parts/components are targeted for inspection depending on type and age of the ship. For these reasons, surveyors use check-lists listing the items to be surveyed for any given survey type, ship type and ship age. Instruction to surveyors are generally provided by inspection bodies and such documentation is considered confidential in commerce and not shared even among IACS members.

- Where?

It indicates the location of the ship in which the inspection has to be carried out. It depends on the ship type, on its maintenance status and if it is in service or at dock. Actually, also the location of the ship during the survey event is significant as e.g. environmental conditions and shore support may largely influence the inspection performances.

- How?

An inspection can be performed visually or by investigating selected areas using a method of non-destructive evaluation. Moreover, in order to classify the visual inspection level, ship surveys are generally categorized as follows:

- An **Overall Survey** is intended to report on the overall condition of the hull structure. Surveyors visually inspect the hull structure at a certain distance in order to determine the location of the problem areas and the planning of additional close-up surveys. Normally, no detailed data on defects is expected to be gathered.
- A **Close-Up Survey** is a survey where the details of structural components are within the close visual inspection range of the surveyor i.e. normally within reach of hand. Data on cracks, thickness gauges and other localized defects are expected to be measured and recorded. Rules require close-up surveys of critical areas depending on the ship's age and type.
- When?

It takes into consideration both the frequency with which the inspections are carried out, as well as the timing of the inspection. They can be briefly described as follows:

- **Annual Surveys**, mainly visual inspections, lasting approximately one or two days. They are carried out annually to ensure that the hull structure, equipment and machinery are kept in satisfactory condition;
- **Intermediate Surveys** carried out in the middle of

2. Breve panoramica delle procedure di ispezione attuali (di tipo umano)

Considerando il livello di sicurezza relativamente soddisfacente del settore navale, qualsiasi approccio alla definizione delle prove per la valutazione e la certificazione delle prestazioni delle piattaforme RAS nelle ispezioni navali dovrebbe partire da un confronto con le attuali pratiche di ispezione mediante indagini condotte da esseri umani (IACS Rec. 76, 2007). A tal fine, è importante analizzare l'estensione delle indagini richieste. Un approccio per farlo, è applicare il metodo "Four Ws and How", presentato in (Rizzo et al., 2008) e (Rizzo, 2011) rispondendo a cinque domande fondamentali:

- Chi? (Who?)

Per il momento, i surveyor umani, ma in alcuni casi le tecnologie RAS sono già state utilizzate in collaborazione con i surveyor.

- Perché? (Why?)

Questa domanda si riferisce a:

- **Per chi** viene effettivamente effettuata un'ispezione, ovvero fissando implicitamente gli obiettivi dell'ispezione, ma anche se ci sono ragioni specifiche per tale ispezione.
- **Per quali motivi** viene eseguita l'ispezione, ad esempio che si tratti di un'ispezione periodica programmata, che sia successiva ad un incidente o ad una condizione di classe imposta da rettificare, o ci siano aree sospette dove sono necessarie ispezioni più frequenti.
- Che cosa? (What?)

Si riferisce ai componenti strutturali specifici da controllare a bordo. Poiché di solito non è possibile eseguire un'ispezione dell'intera struttura della nave o dei suoi macchinari, esistono regole e linee guida basate sull'esperienza empirica che indicano per quali parti / componenti occorre l'ispezione a seconda del tipo e dell'età della nave. Per questi motivi, i surveyor utilizzano check-list che elencano i particolari da esaminare per un dato tipo di indagine, tipo ed età della nave. Le istruzioni ai surveyor sono generalmente fornite dagli organismi di ispezione e tale documentazione è considerata riservata a livello commerciale e non condivisa nemmeno tra i membri IACS.

- Dove? (Where?)

Indica l'ubicazione della nave in cui deve essere effettuata l'ispezione. Dipende dal tipo di nave, dal suo stato di manutenzione e se è in servizio o in banchina. In realtà, anche la posizione della nave durante l'evento ispettivo è significativa, ad esempio per le condizioni ambientali ed il supporto a terra che possono influenzare ampiamente le prestazioni dell'ispezione.

- Come? (How?)

Un'ispezione può essere eseguita visivamente o indagando su aree selezionate, utilizzando o meno un metodo di con-

each five-year cycle, lasting 3-4 days. They are similar to the annual surveys with additional detailed examination of one or few selected parts, e.g. ballast and cargo tanks. It is noted that the ship's bottom is examined during this survey. This can take place in water either by remotely instructed/operated human divers and/or vehicles or in a dry-dock;

- **Special Surveys** carried out every five years, lasting one or two weeks. They consist in a thorough analysis of each compartment in order to provide a complete picture of the condition of the ship's structure, facilities and machinery.

Twenty years ago, the survey schedules have been partially harmonized and regulated by the International Maritime Organization (IMO) under the harmonized system of survey and certification (HSSC) with the aim at providing a list of details to be checked during the dry-docking surveys of the ship in a five years scheme. The IMO Enhanced Survey Programme (ESP) had been earlier introduced to face the lack of safe handling practices of bulk carriers and tankers by IMO resolution A 744 (18). However, the survey scope and approach have basically been unchanged for decades, despite the tremendous advancements of technologies in several fields.

The above definition of close-up survey was however clearly inadequate considering nowadays-available technological resources and it has been recently updated by IACS considering the possibility to use RAS for remote inspection, (Z10.1 Hull survey, 2010), (Z10.2 Hull survey, 2015), (Z7 Hull classification, 2011). The surveyor would not be within reach of hand, but he/she may have a similar sensorial experience through new technologies. Such a minor modification would be probably followed in the next years by more substantial improvements of the ship inspection regulatory regime to account for the tremendous advancements in digital technologies. Starting from the above detailed analysis of surveys, the needs for creating RAS testing protocols and scenarios is derived.

Rules, standards, training and experience of inspection practice, developed for decades, brought the influence of human factor at such an acceptable level that, at present, the aim of using RAS is not to obtain more accurate and reliable results than those available from human surveyors. Robotic means must achieve at least the same information quality a human can collect for structural assessments and possibly in a format easy to elaborate either automatically or by engineering judgment.

In the light of this, it is clear that every effort in trying to identify procedures, metrics and scenarios to objectively assess RAS performances cannot leave aside, at least at this stage, a certain level of human evaluation. In the following, a possible approach, as followed in the framework of the ROBINS project to carry out the assessment of RAS-aided inspections, is presented.

trollo non distruttivo. Inoltre, al fine di classificare il livello di ispezione visiva, i rilievi navali sono generalmente classificati come segue:

- **L'ispezione generale** ha lo scopo di riferire sulle condizioni generali della struttura dello scafo. I surveyor ispezionano visivamente la struttura dello scafo a una certa distanza per determinare l'ubicazione delle aree critiche e la pianificazione di ulteriori indagini ravvicinate. Normalmente non è prevista la raccolta di dati dettagliati sui difetti.
- **L'ispezione ravvicinata** prevede invece rilievi in cui i dettagli dei componenti strutturali sono disponibili all'interno del campo di ispezione visiva ravvicinata del surveyor, ovvero normalmente a portata di mano (at reach of hand). I dati su cricche, misurazioni di spessore ed altri difetti localizzati dovrebbero essere misurati e catalogati. Le regole richiedono indagini ravvicinate delle aree critiche a seconda dell'età e del tipo di nave.
- Quando? (When?)

Prende in considerazione sia la frequenza con cui vengono effettuate le ispezioni, sia la tempistica dell'ispezione. Possono essere brevemente descritti come segue:

- **Ispezioni annuali**, principalmente ispezioni visive, della durata di circa uno o due giorni. Vengono eseguite annualmente per garantire che la struttura dello scafo, le attrezzature e i macchinari siano mantenuti in condizioni soddisfacenti;
- **Ispezioni intermedie**, condotte a metà di ogni ciclo quinquennale, della durata di 3 - 4 giorni. Sono simili alle ispezioni annuali con un esame dettagliato aggiuntivo di una o poche parti selezionate, ad es. cisterne di zavorra e stive del carico. Si noti che la carena della nave può essere esaminata durante questa ispezione. Ciò può avvenire a nave galleggiante per mezzo di sommozzatori istruiti dal surveyor e/o con veicoli subacquei azionati a distanza oppure in un bacino di carenaggio (molto meno frequente per visite intermedie);
- **Ispezioni speciali**, effettuate ogni cinque anni, della durata di una o due settimane. Consistono in un'analisi approfondita di ogni compartimento al fine di fornire un quadro completo delle condizioni della struttura, degli impianti e dei macchinari della nave e comprendono l'ispezione in bacino.

Venti anni fa i programmi delle ispezioni sono stati parzialmente armonizzati e regolamentati dall'International Maritime Organization (IMO) nell'ambito del sistema armonizzato di rilevamento e certificazione (HSSC) con l'obiettivo di fornire un elenco di dettagli da controllare durante i rilievi in bacino di carenaggio della nave con un programma quinquennale.

Il programma IMO Enhanced Survey Program (ESP) era stato introdotto in precedenza per sopperire alla mancanza

3. Overview of RAS' capabilities

3.1 General overview

In order to assess equivalency between current (human) survey practice and RAS assisted one, it is necessary to evaluate the RAS abilities in a ship environment by studying the challenges to be faced in this operational context. While the "Who?", "Why?" and "What" questions can be considered, for the time being, somehow trivially dealt with only considering minor differences between current and RAS-assisted inspections, this is not the case for "Where?" and "How?" ones. It is in fact common to find wide open spaces on board of a cargo ship, as well as narrow areas and dark passages. To inspect these zones, RAS platforms must be able to move in large areas, by reaching significant heights in suitable time, analogous or shorter than that of a typical human inspection event, but also to go through narrow spaces and this limits the size of the RAS. Moreover, it is often required to check the status of a specific area, machinery or hull fittings and equipment as well, despite the ROBINS project and the involved RAS are intended for ship structures. To this purpose, it is essential for the RAS to have localization systems to avoid obstacles and define precise paths to reach pre-established points, i.e. orienteering capabilities. Regarding the question "How?", the autonomous systems have to carry out overall surveys by means of visual inspections and close-up surveys also measuring the thickness of the structural components, as a human surveyor would do. This calls for rather differentiated RAS features and capabilities.

Currently, the available technology does not allow to have a universal RAS able to satisfy all requests. However, research projects developed in recent years have identified different suitable RAS tools for this aim. Below a non-exhaustive list of possible different sensing devices currently available is exemplarily reported to offer an overview of the potential of RAS technologies, if various RAS types are used:

- 2D and 3D laser scanners allow obtaining a geometrical model of the inspected area without resorting to multi-level mapping approaches. This technology is widely used for its accuracy and speed; however, it requires rather large platforms due to the weight and volume occupied by the main navigation sensor.
- Vision-based navigation has become quite popular lately, thanks to the richness of the sensor data supplied, combined with low weight, low power designs and a relatively low price.
- Depth and RGB-D cameras are the last type of sensor that has been incorporated to implement autonomous navigation. RGB-D cameras give reasonably accurate mid-resolution depth and appearance information at high data rates, computing the alignment between frames by jointly optimizing through both appearance and shape matching. These systems can accurately align

di pratiche di ispezione soddisfacenti di navi portarinfuse e petroliere dalla risoluzione IMO A 744 (18). Tuttavia, la portata e l'approccio dell'indagine sono rimasti sostanzialmente invariati per decenni, nonostante gli enormi progressi delle tecnologie in diversi campi.

La definizione di rilievo ravvicinato (close-up survey) era tuttavia chiaramente inadeguata considerando le risorse tecnologiche attualmente disponibili ed è stata recentemente aggiornata dall'IACS, considerando la possibilità di utilizzare tecnologie RAS per l'ispezione da remoto, (IACS UR Z10.1, 2010), (IACS UR Z10.2, 2015), (IACS UR Z7, 2011). Il surveyor non avrebbe i dettagli da ispezionare a portata di mano, ma potrebbe avere un'esperienza sensoriale simile attraverso le nuove tecnologie. Una modifica in tal senso dovrebbe probabilmente essere seguita nei prossimi anni da miglioramenti più sostanziali del regime normativo dell'ispezione delle navi, per tenere conto degli enormi progressi nelle tecnologie digitali. Partendo dall'analisi di dettaglio delle normative applicabili, si deduce la necessità di creare protocolli e scenari di prova per le tecnologie RAS applicate a bordo.

Regolamenti, normative unificate, formazione ed esperienza nella pratica ispettiva, sviluppata per decenni, hanno portato l'influenza del fattore umano a un livello talmente soddisfacente che, allo stato attuale, lo scopo dell'utilizzo di tecnologie RAS non è quello di ottenere risultati più accurati e affidabili di quelli che i surveyor possono mettere a disposizione. I mezzi robotici devono raggiungere almeno la stessa qualità delle informazioni che un essere umano può raccogliere per le valutazioni strutturali e possibilmente in un formato facile da elaborare automaticamente o tramite valutazioni di tipo ingegneristico.

Alla luce di ciò è chiaro che ogni sforzo nel cercare di identificare procedure, indicatori e scenari per valutare oggettivamente le prestazioni di tecnologie RAS non può prescindere, almeno in questa fase, da un certo grado di valutazione umana. Di seguito, viene presentato un possibile approccio, come si è scelto di fare nel contesto del progetto ROBINS, per effettuare la valutazione delle ispezioni assistite da tecnologie RAS.

3. Panoramica delle potenzialità delle tecnologie RAS

3.1 Aspetti generali

Al fine di valutare l'equivalenza tra l'attuale metodologia di indagine (umana) e quella assistita da RAS, è necessario valutare le potenzialità dei RAS nell'ambiente navale analizzando le sfide da affrontare in questo contesto operativo. Mentre oggi le domande "Chi?", "Perché?" e "Cosa?" possono essere considerate in qualche modo banalmente trattate, con solo piccole differenze tra le ispezioni attuali e quelle

and map large indoor environments, as well as feature-less corridors and poorly lit rooms in near-real time.

- Wireless-based localization has been recently developed as an alternative of GPS in poor signal reception areas like ship cargo holds. Ultra-Wide Band (UWB) systems have emerged as one of the leading positioning technologies because the UWB ultra-short pulses are resilient to frequency-dependent absorption, thanks to their large bandwidth, and because ultimate accuracy can range from 2 cm (ideal conditions) to 50 cm (non-line of sight scenario).

Pursuing this line, aerial vehicles have often been chosen as suitable means to carry out visual evaluations (Overall inspection), while climbing robots, which are in contact with the structure, are selected to perform thickness gauging and non-destructive testing (Close-up survey). Robots based on the motion features of animals (like insects, snakes, lizards, geckos, snails, etc.) belongs to this latter category. Many options have already been studied at the University of Genoa, proposing simulations and prototypes attempting to mimic animals' performances (see Fig. 3).

3.2 Specific examples

The RAS platforms involved in the ROBINS project were selected to cover the whole range of ship inspection needs (except for underwater vehicles, already in use since some time for underwater inspections): two different types of

assistite da tecnologie RAS, non è il caso delle domande "Dove?" e "Come?".

Infatti, è frequente trovare ampi spazi aperti a bordo di una nave mercantile, così come zone anguste e passaggi bui. Per ispezionare queste zone, le piattaforme RAS devono essere in grado di muoversi in aree vaste, raggiungendo altezze significative in tempi adeguati, analoghi o più brevi di un tipico evento relativo ad un'ispezione umana, ma anche attraversare spazi ristretti, tali da imporre importanti limiti alle dimensioni della piattaforma. Inoltre, è spesso richiesto di verificare lo stato di un'area specifica, di macchinari o di allestimenti dello scafo e anche delle attrezzature, nonostante il progetto ROBINS e le tecnologie RAS coinvolte siano destinate alle strutture navali. A tal fine è fondamentale che la piattaforma disponga di sistemi di localizzazione per evitare ostacoli e definire percorsi precisi per raggiungere punti prestabiliti, cioè capacità di orienteering. Per quanto riguarda la domanda "Come?", i sistemi autonomi devono effettuare rilievi d'insieme mediante ispezioni visive e rilievi ravvicinati misurando anche lo spessore dei componenti strutturali, come farebbe un surveyor umano.

Ciò richiede per le tecnologie RAS funzionalità e capacità piuttosto differenziate.

Attualmente la tecnologia disponibile non consente di avere una piattaforma universale in grado di soddisfare tutte le richieste.

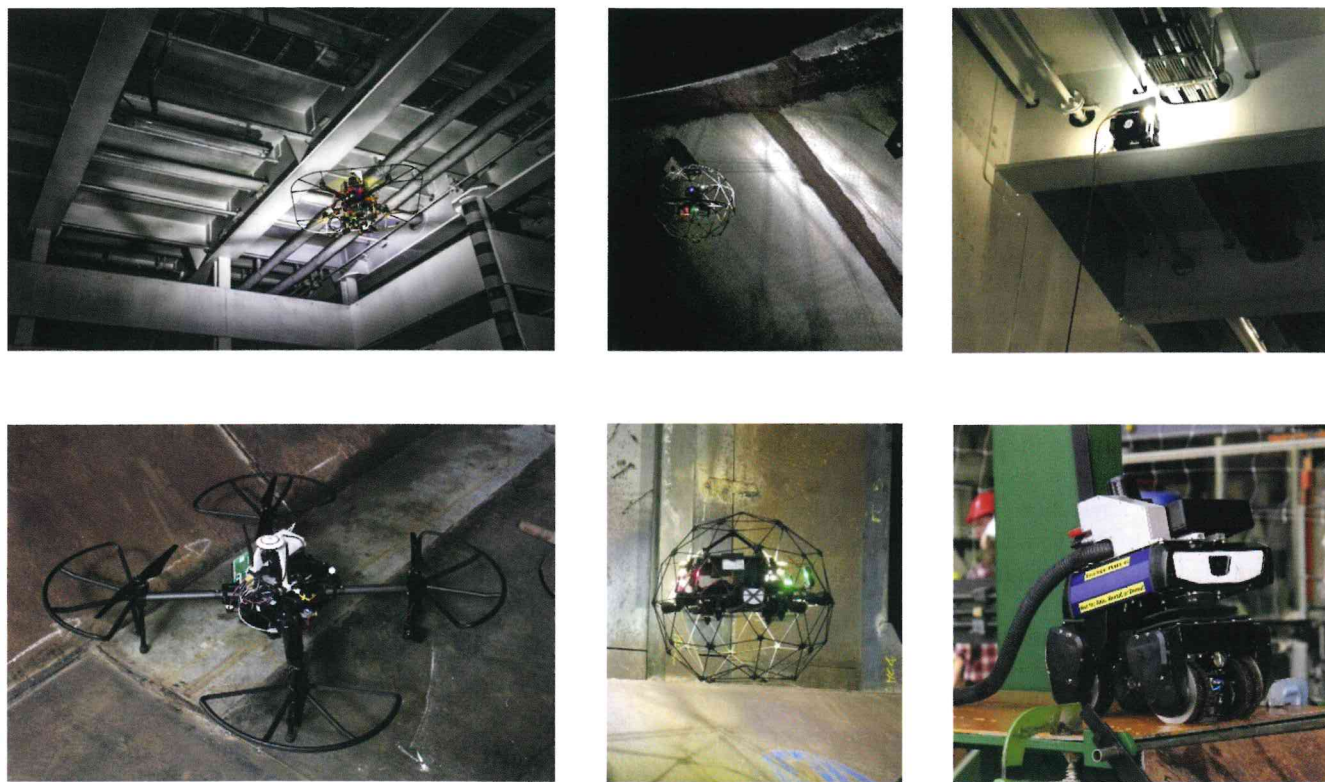


Figura 2 - Piattaforme RAS partecipanti al progetto ROBINS: da sinistra, il drone UIB, il drone FLY, il crawler GEIR.
Figure 2 - RAS involved in the ROBINS project: from left UIB drone, FLY drone, GEIR crawler.

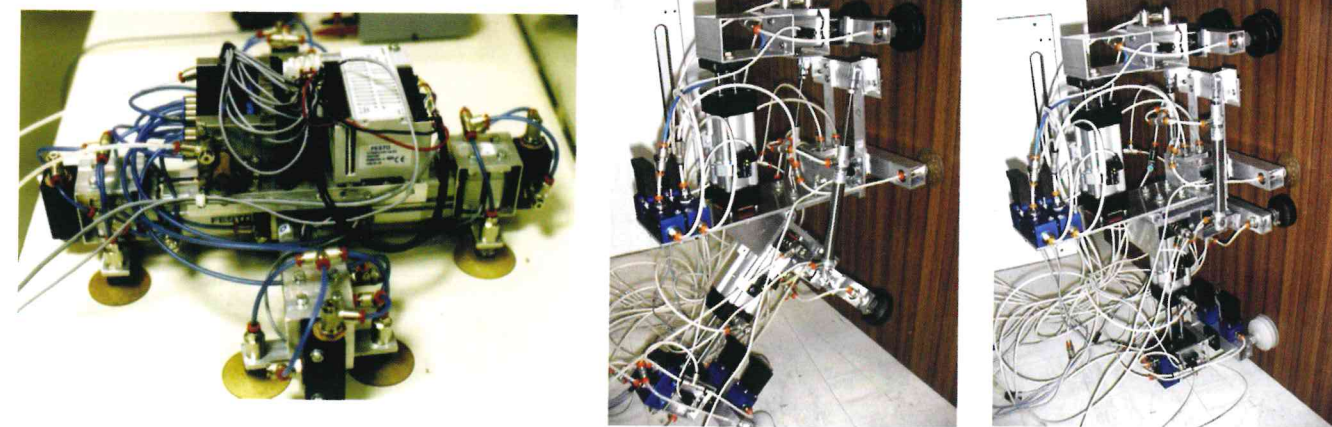


Figura 3 - Prototipi di robot zoomorfo realizzati presso i laboratori di UNIGE.
Figure 3 - Prototypes of zoomorphic robot realized in the UNIGE laboratories.

aerial drones and a magnetic crawler exploit the capabilities of different robotic solutions for different needs. Moreover, open trials are planned for other robotics platforms in the future. These RAS, respectively developed by the Universitat de les Illes Balears (UIB), Flyability Sa (FLY) and Ge Inspection Robotics (GEIR), are presented in Fig. 2.

The aerial drones differ in size and abilities. The former is designed to fly in wide open spaces independently, for data collection at safety-compromised areas, difficult to reach by humans and ground vehicles, and with large spaces to be covered as fast as possible, as in the case of cargo holds inspection. The latter is especially dedicated to carry out inspections in narrow spaces being collision tolerant.

The indoor inspection of cluttered spaces faces a different type of challenge than in large open areas. Typically, ballast tanks involve flying through manholes in confined spaces where only a few centimetres are available on each side of the robot, typically with a high density of obstacles because of the stiffening system of ship structures. For this reason, fixed protections are added to drones in order to mitigate collision damages.

The third RAS represented in Fig. 2 is a crawler platform. Nowadays crawlers are one of the most common solutions for close-up surveys. As the ship structure is made of steel, magnetic adhesion is typically used for generating the contact force required to provide both adhesion and propulsion. To this way, crawlers run on magnetic wheels or tracks, inspecting vertical or even over-hanging structures. The wheels can easily deliver magnetic forces 2 to 5 times the weight of the robot, thus providing a reasonable safety margin against detachment even under sub-optimum surface conditions, such as paint and dirt layers or rust.

Nevertheless, these devices still have many limits in their application.

In general, flying in confined spaces involves many challenges for a conventional drone:

- Electromagnetic field disturbances between RAS plat-

Tuttavia, i progetti di ricerca sviluppati negli ultimi anni hanno identificato diversi strumenti RAS adatti a questo scopo. Di seguito viene riportato a titolo di esempio un elenco non esaustivo di possibili diversi dispositivi di rilevamento attualmente disponibili per offrire una panoramica del potenziale delle tecnologie RAS, che vengono utilizzati con varie tipologie di piattaforma:

- I laser scanner 2D e 3D consentono di ottenere un modello geometrico dell'area ispezionata senza ricorrere ad approcci basati su mappature multilivello. Questa tecnologia è ampiamente utilizzata per la sua precisione e velocità; necessita comunque di piattaforme piuttosto grandi, a causa del peso e del volume occupato dal sensore di navigazione principale.
- La navigazione basata sulla visione è diventata ultimamente molto popolare, grazie alla ricchezza dei dati forniti dal sensore, combinati con un peso ridotto, ridotta potenza e un prezzo relativamente basso.
- Le telecamere con sensore di profondità (RGB-D) rappresentano l'ultimo tipo di sensore incorporato per implementare la navigazione autonoma. Le telecamere RGB-D forniscono informazioni sulla profondità e sull'aspetto a media risoluzione ragionevolmente accurate con velocità di dati elevate, calcolando l'allineamento tra i fotogrammi, ottimizzando congiuntamente sia l'aspetto che la corrispondenza della forma. Questi sistemi possono allineare e mappare con precisione grandi ambienti interni, corridoi e stanze scarsamente illuminate in tempo quasi reale.
- La localizzazione wireless è stata recentemente sviluppata come alternativa al GPS in aree di scarsa ricezione del segnale, come le stive delle navi. I sistemi a banda ultra-larga (UWB) si sono distinti come una delle principali tecnologie di posizionamento perché gli impulsi ultracorti UWB sono resistenti a fenomeni di assorbimento dipendenti dalla frequenza, grazie alla loro ampia larghezza di banda e perché la precisione

forms and onboard electronic systems can be an issue, both for vessel and robots, considering that nowadays ships are more and more digitalized. Furthermore, since the surrounding environment is made of steel, GPS signals for RAS localization cannot be used inside ship hulls. Although, alternatives, such as inertial systems or distance detection for positioning has to be adopted and properly tested.

- Problems related to the obstacles detection or keeping position on a visual reference in environments with poor (or no) lighting such as ballast tanks, where cameras are usually affected by motion blur;
- Environments with no feature (e.g. mostly uniform walls, such as a steel plate in a tank), or with reflective surfaces, such as smooth metallic plates, prevent lasers and cameras to work properly, making hard the detection of distance between obstacles;
- Drone's stability is affected by the air turbulences caused by its own propellers in narrow spaces, where the airflow tends to circle back towards the drone. Moreover, in such confined and dirty spaces the raised dust disturbs cameras providing unclear images. Trials highlighted that dust can also affect performances of electric propulsion motors.
- The flight is often carried out beyond line of sight of the operator, with a take-off location outside the hold or tank to maximize safety or due to accessibility issues. This means that the drone cannot be monitored through a direct visual line of sight.

Similarly, several crawlers have been developed for ship inspection, but due to the limited obstacle handling ability they are not suited to inspect some parts of the ship, such as structured cargo holds, stiffeners or (ballast) tanks. The main issue is represented by limited ability to pass non-flat obstacles (e.g. the transition between two surfaces with different slope that needs large forces to free the wheel from the first surface and then move on) as well as the contamination of the wheels with magnetic particles.

It is worth noting that hull structures do not need special cleaning in general, at least not different from usual cleaning for human inspections. Truth to tell, in some cases, less cleaning is required (e.g. for flying RAS some water residuals on the bottom of a tank are acceptable being removed by propeller flow). For thickness gauging, the RAS are equipped with devices able to locally clean the gauging spot as appropriate.

Another solution for RAS in direct contact with the structures, i.e. able of performing direct measures, are those with adhesion based on suction cups. A team of cooperant climber robots has been designed at UNIGE for autonomous inspections inside ships and offshore platforms consisting of four units pneumatically powered and controlled by Actuator-Sensor-interface technology (Fig. 3). Each unit is equipped with video-camera and ultrasonic thickness measurement device; other sensors and transducers can be added

massima può variare da 2 cm (condizioni ideali) a 50 cm (scenario non in linea di vista con la piattaforma BVLOS, Beyond Visual Line of Sight).

Perseguendo questa linea, sono stati spesso scelti veicoli aerei come mezzo idoneo per effettuare valutazioni visive (ispezione d'insieme), mentre robot capaci di arrampicarsi, a contatto con la struttura, sono selezionati per eseguire misure di spessore e controlli non distruttivi (e close-up survey). I robot che riproducono i movimenti degli animali (come insetti, serpenti, lucertole, gechi, lumache, ecc.) appartengono a quest'ultima categoria. Molte opzioni sono già state studiate presso l'Università di Genova, proponendo simulazioni e prototipi che tentano di imitare le prestazioni degli animali (Figura 3).

3.2 Esempi specifici

Le piattaforme RAS coinvolte nel progetto ROBINS sono state selezionate per coprire l'intera gamma delle esigenze delle ispezioni navali (ad eccezione dei veicoli sottomarini, già in uso da tempo per le ispezioni subacquee): due diverse tipologie di droni aerei e un crawler magnetico sfruttano le capacità di diverse soluzioni robotiche per diverse esigenze. Inoltre, in futuro sono previste prove aperte per altre piattaforme di tipo robotico. Questi RAS, sviluppati rispettivamente dall'Universitat de les Illes Balears (UIB), Flyability Sa (FLY) e Ge Inspection Robotics (GEIR), sono presentati nella Figura 2.

I due droni aerei citati differiscono per dimensioni e capacità. Il primo è progettato per volare in ampi spazi aperti in modo indipendente, per la raccolta dati in aree compromesse per ragioni di sicurezza, di difficile accesso da parte di persone e veicoli terrestri, e con ampi spazi da coprire il più velocemente possibile, come nel caso dell'ispezione delle stive di carico. Il secondo è particolarmente dedicato per eseguire ispezioni in spazi ristretti, tollerando le collisioni. L'ispezione interna di spazi ingombri affronta un diverso tipo di sfida rispetto alle grandi aree aperte. Tipicamente, le cisterne di zavorra delle navi comportano il volo attraverso passi d'uomo in spazi ristretti dove sono disponibili solo pochi centimetri su ciascun lato del robot, tipicamente con un'alta densità di ostacoli a causa delle strutture di rinforzo dei fasciami delle navi. Per questo motivo, ai droni vengono aggiunte protezioni fisse per mitigare i danni da collisione. La terza tecnologia RAS rappresentata nella Figura 2 è una piattaforma crawler. Al giorno d'oggi i crawler sono una delle soluzioni più comuni per le ispezioni a distanza ravvicinata. Poiché la struttura della nave è in acciaio, l'adesione magnetica viene tipicamente utilizzata per generare la forza di contatto richiesta per fornire sia adesione che propulsione. In questo modo i crawler si muovono su ruote o cingoli magnetici, ispezionando strutture verticali o addirittura sospesi ad esse. Le ruote possono facilmente fornire forze magnetiche da 2 a 5 volte il peso del robot, fornendo così un ragionevole margine di sicurezza contro il distacco,

and handled, depending on the survey requirements. The aim of these RAS is to realize a portable and user-friendly tool able to move itself on horizontal, inclined or vertical surfaces, with the capacity to jump stiffeners, girders or other structural elements, simplifying and speeding up the inspections with an automatic generation of survey reports, (Ravina, 2007), (Ravina, 2010), (Ravina, 2011), (Ravina, 2012), (Ravina, 2015), (Ravina, 2107), (Ravina, 2017).

What above highlights the efforts made by Universities and private companies to design RAS platforms able of performing inspections on board. Furthermore, it gives a picture of the large variety of possible solutions already available.

In general, the reliability of such technologies in terms of safety and in case of failure has to be developed and assessed. For the time being, fail-safe systems are mainly related to prevent risks for operators but there are also safety ropes for crawlers and warnings for battery discharge to avoid losing the platform during the survey. However, since recovery operations may be dangerous for humans or even impossible, especially onboard ships in service, often damaged RAS are considered missing in action.

Actually, stop functioning/malfunction may occur especially for newly developed RAS and/or pilots under training. Adequate RAS testing, pilot training and team working assessment is essential for the successful implementation of RAS assisted inspections. Such a technological readiness highlights again the need of common protocols and a controlled testing environment to demonstrate their abilities before going onboard ships.

4. RAS vs. human benchmark

It is worth again noting that the current inspection regime originates from a long lasting and sometime painful history and it is nowadays widely accepted by the stakeholders of the shipping community as a good compromise between safety and operational needs.

Remote Inspection Techniques (RIT) may be used to facilitate the required external and internal examinations, including close-up surveys and gauging. Hence, overcoming the need for human inspections, routine maintenance can be remotely monitored in real-time by surveyors and the process of selecting representative spaces could be improved. This is possible, especially for new ships where digitalization is becoming more and more available and user-friendly, as long as realistic virtual representations of on-board spaces are available beforehand, as a result of previous overall inspections and scans, reconstruction of 3D models, advanced processing of images, point clouds and thickness measurements. This, in turn, reduces costs, increases efficiency and significantly reduces the risks for human surveyors. Older ships, on the other hand, may involve higher costs for the remote survey planning to make the 3D models/representations available, but certainly their updating and accessibility is much easier than paper drawings and reports filed in the offices of various stakeholders.

anche in condizioni di superficie non ottimali, come aree verniciate e coperte da sporco o ruggine.

Tuttavia, questi dispositivi presentano ancora molti limiti nella loro applicazione. In generale, volare in spazi ristretti comporta molte sfide per un drone convenzionale:

- I disturbi del campo elettromagnetico tra le piattaforme RAS e i sistemi elettronici di bordo possono essere un problema, sia per le navi che per i robot, considerando che oggi le navi sono sempre più digitalizzate. Inoltre, poiché l'ambiente circostante è fatto di acciaio, i segnali GPS per la localizzazione RAS non possono essere utilizzati all'interno degli scafi delle navi. Tuttavia, alternative, come i sistemi inerziali o il rilevamento della distanza per il posizionamento, devono essere adottate e adeguatamente testate.
- Problemi relativi al rilevamento degli ostacoli o al mantenimento della posizione su un riferimento visivo in ambienti con scarsa (o nessuna) illuminazione come le cisterne di zavorra, dove le telecamere sono solitamente affette da sfocatura dovuta al movimento (blurring).
- Ambienti privi di caratteristiche (per esempio, pareti per lo più uniformi, come una lamiera piana di acciaio in una cisterna), o con superfici riflettenti, come piastre metalliche lisce, impediscono a laser e telecamere di funzionare correttamente, rendendo difficile il rilevamento della distanza tra gli ostacoli.
- La stabilità del drone è influenzata dalle turbolenze d'aria causate dalle sue stesse eliche in spazi ristretti, dove il flusso d'aria tende a tornare indietro verso il drone. Inoltre, in tali spazi ristretti e sporchi la polvere sollevata disturba le telecamere fornendo immagini poco nitide. Le prove hanno evidenziato che la polvere può anche influenzare le prestazioni dei motori elettrici di propulsione.
- Il volo viene spesso effettuato oltre la linea di vista dell'operatore (BVLOS, Beyond Visual Line of Sight), con una posizione di decollo fuori dalla stiva o dalla cisterna per massimizzare la sicurezza o a causa di problemi di accessibilità. Ciò significa che il drone non può essere monitorato attraverso una linea visiva diretta.

Allo stesso modo, diversi crawler sono stati sviluppati per l'ispezione delle navi, ma a causa della limitata capacità di gestione degli ostacoli non sono adatti per ispezionare alcune parti della nave, quali stive di carico con rinforzi a vista di piccole dimensioni o con sezione a bulbo, ambienti separati da diaframmi e accessibili attraverso fori di passaggio, etc. Il problema principale è rappresentato dalla limitata capacità di superare ostacoli non piani (ad esempio, il passaggio tra due superfici con pendenza diversa che necessita di grandi forze per liberare la ruota dalla prima superficie e poi proseguire) oltre che dalla contaminazione delle ruote con particelle magnetiche.

Vale la pena notare che le strutture dello scafo non necessitano di una pulizia speciale in generale, almeno non diver-

Because of significant implications on safety as well as on commercial activities, the survey practices of ship and marine structures, their effectiveness and quality level are crucial. As a matter of fact, while the technologies are in principle available, it is necessary to assess and possibly to adapt them to the rather special features of ship and offshore structures, and of the shipping community in general in order to be widely accepted and effectively applied.

These motivations have led to the development of projects aimed at the assessment and certification of systems for remote inspections, even if it is not currently possible to implement a single device which is able to perform all the actions carried out by a human surveyor during an inspection (e.g., look with two eyes, climb over obstacles, smell, touch, hammering, etc ...). For this reason, human evaluation still remains the absolute criterion for ship hull surveys and, up to now, comparison between human and RAS performances is the only agreed assessment pathway.

There is therefore the need to ascertain that RAS inspections are at least as effective as human ones and such equivalency needs to be appropriately verified by a third party, possibly in a controlled environment where well defined tests can be performed collecting all necessary information.

It is believed that RAS technology are mature enough to think that some tasks of the surveyor can be accomplished by their use. The real challenge is represented by the assessment of their accuracy and, more in detail, the assessment of the difference between human and RAS survey output.

For example, a thickness gauging taken by the robot must be equivalent to that measured by the human surveyor in the same environmental conditions (light, humidity, air currents) or surface conditions (dirty, wet, clean, reflective, tilted, etc.), taken within a reasonable time and with pre-established tolerances. For the time being, thickness measurements are generally carried out employing same sensors used by human surveyors and therefore measured data have similar uncertainties. Of course, human and RAS-assisted surveys adopt different handling and practical management in thickness gauging. Hence, equivalency is to be assessed as well in terms of sampling frequency, readings per unit area, averaging approach, etc.

To this purpose, testing protocols have been conceived to evaluate the efficiency of RAS in performing selected tasks, including

thickness measurements, and testing facility layouts were developed within the ROBINS project looking forward to become the basis for a proposal of international standards, recognized and accepted by stakeholders and authorities. Standards are a precondition to stimulate the robotics industry and unleash the economic potential of new markets.

sa dalla normale pulizia prevista per ispezioni umane. A dire il vero, in alcuni casi, è necessaria una minore pulizia (ad esempio per il volo RAS è accettabile che alcuni residui d'acqua sul fondo di una cassa vengano spostati dal flusso dell'elica).

Per la misurazione dello spessore, i RAS sono dotati di dispositivi in grado di pulire localmente il punto di misurazione in modo appropriato.

Un'altra soluzione per piattaforme RAS a diretto contatto con le strutture, cioè in grado di eseguire misure dirette, sono quelle con adesione a ventose. Un team di robot arrampicatori (climber) cooperanti è stato progettato presso UNIGE per ispezioni autonome all'interno di navi e piattaforme offshore, composto da quattro unità alimentate pneumaticamente e controllate dalla tecnologia di interfaccia attuatore-sensore (Figura 3). Ogni unità è dotata di videocamera e dispositivo di misura dello spessore ad ultrasuoni; altri sensori e trasduttori possono essere aggiunti e gestiti, a seconda dei requisiti del rilievo. Lo scopo di queste piattaforme RAS è quello di realizzare uno strumento portatile e di facile utilizzo in grado di muoversi su superfici orizzontali, inclinate o verticali, con la capacità di saltare irrigidimenti, travi o altri elementi strutturali, semplificando e velocizzando le ispezioni con una generazione automatica di rapporti di indagine, (Ravina, 2007), (Ravina, 2010), (Ravina, 2011), (Ravina, 2012), (Ravina, 2015), (Ravina, 2107), (Ravina, 2017).

Quanto sopra evidenzia gli sforzi compiuti da Università e aziende private per progettare piattaforme RAS in grado di effettuare ispezioni a bordo. Inoltre, fornisce un quadro della grande varietà di possibili soluzioni già disponibili.

In generale, deve essere sviluppata e valutata l'affidabilità di tali tecnologie in termini di sicurezza e in caso di guasto. Per il momento, i sistemi fail-safe sono principalmente legati alla prevenzione dei rischi per gli operatori, ma sono presenti anche funi di sicurezza per i crawler e monitoraggio del livello di carica della batteria per evitare di perdere una piattaforma aerea durante il rilievo. Tuttavia, poiché le operazioni di recupero possono essere pericolose per l'uomo o addirittura impossibili, specialmente a bordo delle navi in servizio, le piattaforme RAS danneggiate durante la missione spesso sono da considerarsi perse.

In realtà, potrebbero verificarsi interruzioni / malfunzionamenti soprattutto per tecnologie RAS di nuova concezione e / o piloti in formazione. Adeguati test sulle tecnologie RAS, la formazione del pilota e la valutazione del lavoro di squadra con il surveyor sono essenziali per il successo dell'attuazione delle ispezioni assistite da tecnologie RAS. L'ampia disponibilità delle tecnologie evidenzia ancora una volta la necessità di protocolli comuni e di un ambiente di test controllato per dimostrare le proprie capacità prima di salire a bordo delle navi.

5. Testing facility and testing protocols description

5.1 Testing facility for general purpose trials

As above mentioned, performing tests of RAS on-board is a challenging task due to limited time and space availability of ships. Indeed, during annual and intermediate surveys, the ship is generally in service and on-board tests on hull structures are very limited if not impossible, while during dry-docks at special surveys repair works often prevent the free use of ship compartments and spaces. Moreover, logistical issues also arise when taking into account an operating shipyard.

For this reason, the construction of a testing facility for remote inspections on-board ships has been proposed and started at the University of Genova in the framework of the ROBINS project; moreover, testing protocols aimed at assessing RAS inspection abilities were developed.

Currently, no dedicated testing facility for RAS platforms exists to the best of the authors' knowledge. In general, each RAS manufacturer has its own testing protocols, but they are not public and not specifically designed for inspection of ship structures.

The aim of the ROBINS project is to focus on inspections of bulk carriers, as reference ships, which present many aspects of interest also for other types of vessels, in order to reproduce, as much as possible, the various scenarios that can be found on board during structural inspections. According to that, the main module of the testing facility aims at recreating an environment with typical elements of a bulk carrier ship to enable RAS platforms and to assess for their abilities in ship inspections as a general-purpose testing scenario where an inspection event can be suitably simulated.

The RAS should be able to inspect both enclosed narrow spaces full of obstacles, typical of the double bottom and double side structures (ballast tanks), as well as wide volumes with significant heights like bulk carrier cargo holds (see Fig. 4 showing the main module of the testing facility recently established in Genova).

The testing facility is a modular construction with the possibility of changing the environment characteristics in order to simulate the conditions in which real inspections take place (i.e. lightening, humidity, dirt, etc.). It is also composed by an enclosed large volume, with metallic boundaries that simulate a cargo hold, to assess for localization and orienteering abilities, path planning and area coverage capabilities of the platforms. Besides, one of the main features is represented by the use of wasted material coming from existing ships that operated at sea for a certain time, in order to have a good variety of actual defects that can be found onboard in terms of coating conditions, pitting, rust, cracks, notches, distortions, mechanical damages, etc. as overviewed e.g. in (Rizzo et al., 2007) and (Rizzo et al., 2008).

4. Tecnologie RAS e termini di paragone con le ispezioni tradizionali

Vale ancora la pena notare che l'attuale regime di ispezione ha origine da una storia lunga e talvolta dolorosa ed è oggi ampiamente accettato dagli stakeholder dello shipping come buon compromesso tra sicurezza ed esigenze operative.

Le tecniche di ispezione a distanza (RITS) possono essere utilizzate per facilitare gli esami esterni e interni richiesti, comprese le indagini ravvicinate e la misurazione. Quindi, superando la necessità di ispezioni umane, la manutenzione ordinaria può essere monitorata a distanza in tempo reale dai surveyor e il processo di selezione degli spazi rappresentativi potrebbe essere migliorato. Ciò è possibile, soprattutto per le nuove navi, dove la digitalizzazione sta diventando sempre più disponibile e di facile utilizzo, purché siano disponibili in anticipo rappresentazioni virtuali realistiche degli spazi di bordo, a seguito di precedenti ispezioni e scansioni tridimensionali, ricostruzione di modelli CAD 3D, elaborazione avanzata di immagini, nuvole di punti e misurazioni dello spessore. Questo, a sua volta, riduce i costi, aumenta l'efficienza e riduce significativamente i rischi per i surveyor umani. Le navi più vecchie, d'altra parte, possono comportare costi più elevati per la pianificazione del rilievo remoto per rendere disponibili i modelli / rappresentazioni 3D, ma certamente il loro aggiornamento e accessibilità è molto più semplice rispetto ai disegni cartacei e ai rapporti presenti negli uffici dei vari stakeholder. A causa delle implicazioni significative sulla sicurezza e sulle attività commerciali, le pratiche di ispezione delle navi e delle strutture marine, la loro efficacia e il livello di qualità sono cruciali. Di fatto, mentre le tecnologie sono in linea di principio disponibili, è necessario valutarle ed eventualmente adattarle alle caratteristiche particolari delle navi e delle strutture offshore, e dello shipping in generale, al fine di essere ampiamente accettate ed efficacemente applicate.

Queste motivazioni hanno portato allo sviluppo di progetti finalizzati alla valutazione e certificazione di sistemi per le ispezioni a distanza, anche se attualmente non è possibile implementare un unico dispositivo in grado di svolgere tutte le azioni svolte da un surveyor umano durante un'ispezione (ad esempio guardare con due occhi, scavalcare ostacoli, annusare, toccare, martellare, ecc.). Per questo motivo, la valutazione umana rimane ancora il criterio assoluto per le indagini sullo scafo delle navi e, fino ad ora, il confronto tra le prestazioni umane e quelle dei sistemi RAS è l'unico percorso di valutazione praticabile.

Vi è quindi la necessità di accertare che le ispezioni RAS siano efficaci almeno quanto quelle umane e tale equivalenza deve essere opportunamente verificata da una terza parte, possibilmente in un ambiente controllato dove possano essere eseguiti test ben definiti raccogliendo tutte le informazioni necessarie.

Si ritiene che la tecnologia RAS sia abbastanza matura da



Figura 4 - Fotografia del modulo principale della testing facility (dimensioni principali LxWxH 7000x4000x4000 mm).
Figure 4 - Photo of the main module of the testing facility (main dimensions LxWxH 7000x4000x4000 mm).

Fig. 5 shows an example of such typical structural defects and surface condition in specific locations.

The trials sessions carried out up to now in the testing facility were aimed at a general RAS-human comparison of capabilities in orienteering, localization and identification of structural defects. To this aim the testing protocol is a relatively simple one: selected paths were defined along which either real defects and markers were placed as key-points, similarly to current surveyors' inspection practice.

The assessment was carried out in terms of time of inspection and ability to find and locate the key-points (see Fig. 6). Noticeably, it was found that a class (human) surveyor and a team composed by a RAS, its pilot and a ship superintendent

za di campionamento, letture per unità di area, approccio per elaborare il valore medio di un dato, ecc.

A tal fine, sono stati concepiti protocolli di prova per valutare l'efficienza delle tecnologie digitali e robotiche nell'esecuzione di compiti selezionati, tra cui quelle sviluppate nell'ambito del progetto ROBINS sono in attesa di diventare la base per una proposta di norma a livello internazionale, riconosciute e accettate dalle parti interessate e dalle autorità¹. Gli standard sono una precondizione per stimolare l'industria della robotica e liberare il potenziale economico di nuovi mercati.

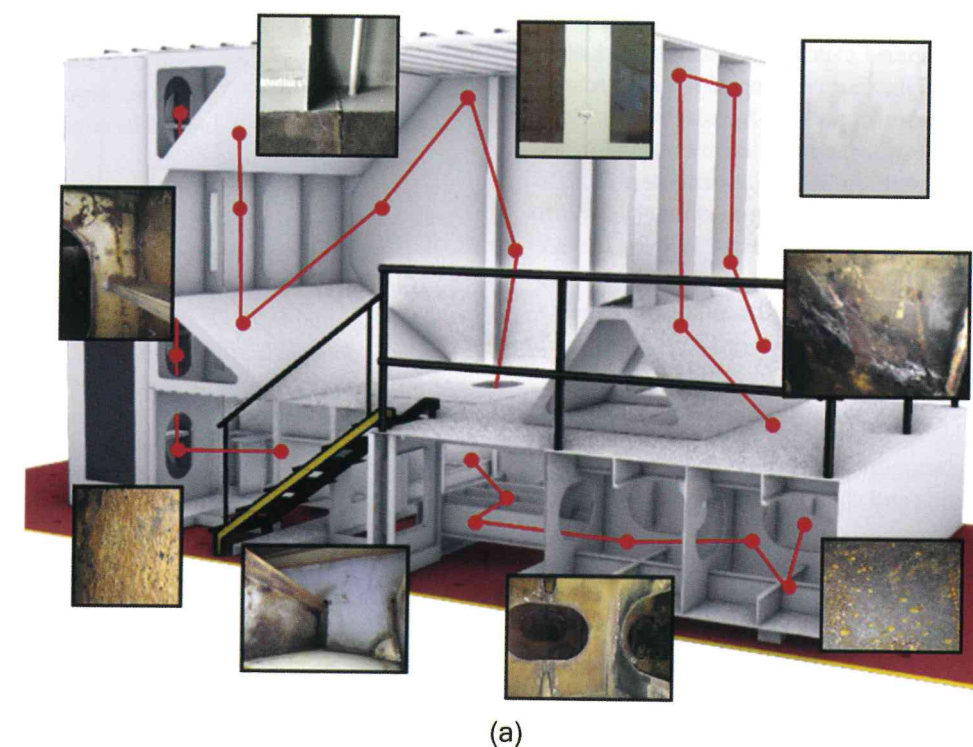
¹ In attesa di ricevere approvazione del brevetto alla data di pubblicazione di questo articolo.



Figura 5 - Da sinistra: esempio di cricca, corrosione e vaiolatura (pitting) nelle strutture della testing facility.
Figure 5 - From the left: example of crack, corrosion and pitting occurring in the testing facility structures.

pensare che alcuni compiti del surveyor possano essere svolti con il suo utilizzo. La vera sfida è rappresentata dalla valutazione della loro accuratezza e, più in dettaglio, dalla valutazione della differenza tra l'output dell'ispezione condotta da umani e quella con RAS.

Ad esempio, una misurazione dello spessore condotta dal robot deve essere equivalente a quella misurata dal surveyor umano nelle stesse condizioni ambientali (luce, umidità, flussi d'aria) o di superficie (sporca, bagnata, pulita, riflettente, inclinata, ecc.), impiegando tempi ragionevoli e con tolleranze prestabilite. Per il momento, le misurazioni dello spessore vengono generalmente eseguite utilizzando gli stessi sensori utilizzati dai surveyor umani, quindi i dati misurati hanno incertezze simili. Naturalmente, le indagini umane e quelle assistite da tecnologie RAS adottano una manipolazione e una gestione in pratica diverse nella misurazione dello spessore. Pertanto, l'equivalenza deve essere valutata anche in termini di frequen-



(a)



(b)



(c)

Figura 6 - Percorso di prova pianificato (a). Il RAS dovrebbe essere in grado di seguire un percorso prestabilito per raggiungere i way-point, come ad esempio (b) e (c), in una data sequenza.
Figure 6 - Path planning test (a). RAS should be able to follow a fixed path to reach control key-points e.g. (b) and (c) in a given sequence.

completed the test protocol with very similar results (only one key-point with defect missed) and in approximately the same time. However, it was noted that communication and cooperation between pilot and superintendent represent a key point. As a matter of fact, in many cases, drone pilots are not familiar with a ship environment often missing the terminology about the different structural elements. On the other side the human surveyor may lose orientation by looking only at the screen.

A controlled and easily accessible environment, where repeatable test protocols can be implemented, significantly increases development opportunities for new platforms and reduces costs and risks. The data obtained from laboratory

5. Descrizione delle attrezzature (testing facility) e dei protocolli di prova

5.1 Testing facility per verifiche generali

Come accennato in precedenza, l'esecuzione di test di tecnologie RAS a bordo è un compito impegnativo a causa della limitata disponibilità di spazi e di tempo delle navi. Infatti, durante le verifiche annuali e intermedie, la nave è generalmente in servizio e le prove a bordo sulle strutture dello scafo sono molto limitate, se non impossibili, mentre

tests could be compared with those collected during on-board trials. Any gap found may be used as feedback to review the testing protocols, thus creating an iterative refining process leading to the reasonable replacement of on-board trials with equivalent tests in a controlled environment, with the purpose of developing the RAS platforms as well as assessing the RAS capabilities according to standardized procedures.

5.2 Navigational skills and rule requirements

Localization, path planning and area coverage capabilities are key features in remote inspections, so they should be adequately assessed. Hence, developing and testing navigation skills of RAS is of paramount importance along with the abilities aimed at detecting and characterize structural defects in ship structures.

As a matter of fact, human surveyors localize themselves and then use their own sensorial experience to detect and characterize structural defects they deem useful for subsequent structural assessments according to rule requirements. Contrarily, to localize the robots in GPS-denied environments, RAS have to develop alternative ego-motion features, such as visual or odometry systems, which are able to continuously update their position not depending on external infrastructures. In other words, the drone must be able to localize itself by elaborating data (e.g. pictures or distance measures) locally collected and processed onboard without communication with an external infrastructure (e.g. GPS satellites). As above mentioned, the electromagnetic compatibility of such systems need also to be checked in the testing facility.

In the previously described test protocols, the RAS must reach key-points in a given sequence and follow specific paths facing different challenges, obstacles and disturbances. While moving from one point to another the RAS, analogously to human surveyors, collect data useful for structural assessment: i.e. when a specific point is reached, RAS (or surveyor) has to accomplish the tasks related to detect and characterize structural defects in that specific point. Generally, narrative reports produced by humans contain a limited amount of already pre-processed data, if compared to what can be acquired by a digital system, which instead is a massive amount of raw information to be further elaborated.

Points were placed inside the testing facility at significant locations depending on current rule requirements and according to usual inspection practice (e.g. critical areas inside a bulk carrier's Cargo Hold as defined in IACS Unified Requirements for inspections such as Z10.1 and Z10.2, (Rizzo, 2011), (Z10.1 Hull surge, 2010), (Z10.2 Hull surge, 2015)). I.e. for the time being the testing protocols simulate the human approach to inspection.

In order to address the need of standardized test protocols, each point is identified by a marker symbol placed onto the structure (see Fig. 7). The control points were divided in families, categorized on the basis of the location (cargo hold or ballast tank), the position (e.g. on a plate or on stiffeners,

nei bacini di carenaggio, in occasione di visite speciali, le attività di riparazione spesso impediscono il libero utilizzo degli spazi della nave. Inoltre, sorgono problemi logistici anche quando si tiene conto delle esigenze di operatività di un cantiere navale.

Per questo motivo è stata proposta e avviata presso l'Università di Genova, nell'ambito del progetto ROBINS, la realizzazione di una struttura di validazione per le ispezioni eseguite con tecnologie RAS a bordo delle navi; inoltre, sono stati sviluppati protocolli di prova volti a valutare le capacità di ispezione delle piattaforme RAS.

Al momento, al meglio delle conoscenze degli autori, non esiste alcuna struttura di test dedicata per le piattaforme RAS in questo ambito. In generale, ogni produttore di RAS ha i propri protocolli di prova, ma non sono pubblici e non sono specificatamente progettati per l'ispezione delle strutture delle navi.

Lo scopo del progetto ROBINS è quello di concentrarsi sulle ispezioni di portarinfuse, come navi di riferimento, che presentano molti aspetti di interesse anche per altre tipologie di navi, al fine di riprodurre, per quanto possibile, un set completo di scenari che si possono trovare a bordo durante le verifiche strutturali. In base a ciò, il modulo principale della testing facility mira a ricreare un ambiente con elementi tipici di una nave portarinfuse per abilitare le piattaforme RAS e valutare le loro capacità nelle ispezioni delle navi come scenario di prova generale, in cui un evento di ispezione può essere opportunamente simulato.

I RAS dovrebbero essere in grado di ispezionare sia spazi chiusi e stretti, pieni di ostacoli, tipici delle strutture del doppio fondo e doppio fianco (cisterne di zavorra), sia ampi volumi con altezze significative come le stive delle navi portarinfuse (vedere la Figura 4, in cui si osserva il modulo principale del centro di prova recentemente costituito a Genova).

La struttura è una costruzione modulare con la possibilità di modificare le caratteristiche dell'ambiente al fine di simulare le condizioni in cui avvengono le ispezioni reali (ad esempio, fulmini, umidità, sporco, ecc.) È inoltre composta da un grande volume chiuso, con delimitazioni metalliche che simulano una stiva, per valutare le capacità di localizzazione e orientamento, pianificazione del percorso e capacità di copertura dell'area delle piattaforme RAS.

Inoltre, una delle caratteristiche principali è rappresentata dall'utilizzo di materiale proveniente da navi esistenti, che hanno operato in mare per un certo tempo, in modo da avere una buona varietà di imperfezioni effettivamente riscontrabili a bordo in termini di condizioni di rivestimento, variolatura, stati di ossidazione, cricche, intagli, deformazioni, danneggiamenti di tipo meccanico, ecc. come illustrato ad esempio in (Rizzo et al., 2007) e (Rizzo et al., 2008). La Figura 5 mostra un esempio di tali tipici difetti strutturali e delle condizioni della superficie in punti specifici della testing facility.

Le sessioni di prova svolte fino ad ora nella struttura di pro-

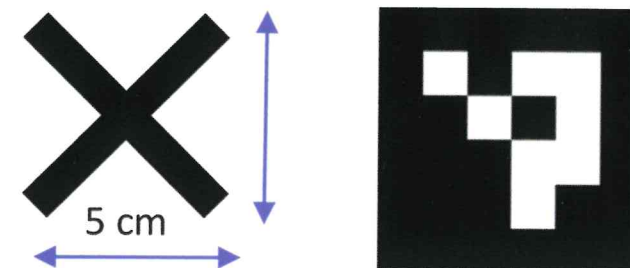


Figura 7 - Esempio di simbolo di way-point e di marker ArUco.
Figure 7 - Example of control point symbol and ArUco marker.

beside their actual location in the main module of the testing facility) and on the basis of the difficulty of reaching the point (easy, medium, difficult). The categorization was made with the support of a (human) experienced surveyor, using the same description given for identifying points on board for inspection in narrative reports (e.g. counting frames number from a reference point and locating the height from the deck, etc. As an example, a class surveyor would write in a report: "crack found at bracket toe of the 3rd frame fwd. aft bhd. of hold no. 3, approx. 0.5 m above the top plate of the lower stool").

To assure the efficiency of the used methodologies, for each configuration, the RAS platform will provide data to be compared with the results obtained by human surveyor, in the same conditions. After the first trials carried out, however, it comes out that there is potential for further development of inspection practice, widening the data acquired and therefore providing more accurate and detailed information for the subsequent structural assessment. Indeed, RAS ego-motion is obtained by well-defined algorithms that can be complemented with databases of detected defects. While human surveyors rely on their skills and experience in order to inspect only a few selected points, likely representing a very small fraction of the actual structural domain to be inspected, RAS are able to scan a much larger part looking for defects. Possibly, this is the way to balance the limited experience in performing RAD-assisted inspections.

As previously stated, RAS are not fully autonomous in the sense that they need some kind of instructions, e.g. a path to follow pre-defined in advance. In principle, no need of piloting is needed for the most advanced RAS during a pre-defined mission, even if a surveyor may require zooming or vision from different viewpoints for the time being in order to reliably assess the structures. Hence, human intervention is somehow necessary.

Protocols would also be required to train the surveyors who will use the images, videos, other results captured by the RAS. This is to ensure that surveyor has a clear understanding of the strengths and limitations of the RAS. Moreover, they should be developed and become specific for the different typologies of robots to ensure the standardization of the tests.

va erano finalizzate a un confronto generale RAS-umano delle capacità di orienteering, localizzazione e identificazione dei difetti strutturali. A tal fine il protocollo di prova è relativamente semplice: sono stati definiti dei percorsi selezionati lungo i quali sono stati posti come way-point sia difetti reali che marker, analogamente alla pratica ispettiva corrente dei surveyor.

La valutazione è stata effettuata in termini di tempo di ispezione e capacità di individuare e localizzare i way-point (Figura 6). È stato riscontrato in una prova che un surveyor (umano) ed un team composto da una piattaforma RAS, il suo pilota e un ispettore di un armatore partecipanti al progetto hanno completato il protocollo di prova con risultati molto simili (un solo way-point con difetto non rilevato in entrambi i casi) e approssimativamente nello stesso tempo. Tuttavia, è stato notato che la comunicazione e la cooperazione tra pilota e ispettore rappresentano un punto cruciale. Di fatto, in molti casi, i piloti di droni non hanno familiarità con l'ambiente di una nave, spesso manca la terminologia tipica navale. Dall'altro lato, il surveyor umano potrebbe perdere l'orientamento guardando solo lo schermo di un telecomando.

Un ambiente controllato e facilmente accessibile, in cui è possibile implementare protocolli di prova ripetibili, aumenta in modo significativo le opportunità di sviluppo per nuove piattaforme e riduce costi e rischi. I dati ottenuti dalle prove di laboratorio potrebbero essere confrontati con quelli raccolti durante le prove a bordo. Qualsiasi lacuna rilevata può essere utilizzata come feedback per rivedere i protocolli di prova, creando così un processo di raffinamento iterativo che porta alla razionale sostituzione delle prove a bordo con prove equivalenti in un ambiente controllato, con lo scopo di sviluppare le piattaforme RAS e di valutare le capacità tecnologiche secondo procedure standardizzate.

5.2 Abilità di navigazione e requisiti regolamentari

Le capacità di localizzazione, pianificazione del percorso e copertura dell'area sono caratteristiche essenziali nelle ispezioni remote, quindi dovrebbero essere adeguatamente valutate. Lo sviluppo e la verifica delle abilità di navigazione delle piattaforme RAS sono quindi di fondamentale importanza insieme alle capacità volte a rilevare e caratterizzare i difetti strutturali nelle strutture delle navi.

I surveyor umani, infatti, localizzano sé stessi ed utilizzano quindi la propria esperienza sensoriale per rilevare e caratterizzare i difetti strutturali che ritengono utili per successive valutazioni strutturali secondo i requisiti della normativa. Al contrario, per localizzare i robot in ambienti senza GPS, si devono sviluppare caratteristiche alternative di ego-motion, come sistemi visivi o odometrici, che sono in grado di aggiornare continuamente la loro posizione indipendentemente dalle infrastrutture esterne. In altre parole, il drone deve essere in grado di localizzarsi elaborando dati (ad esempio immagini o misure di distanza) raccolti local-

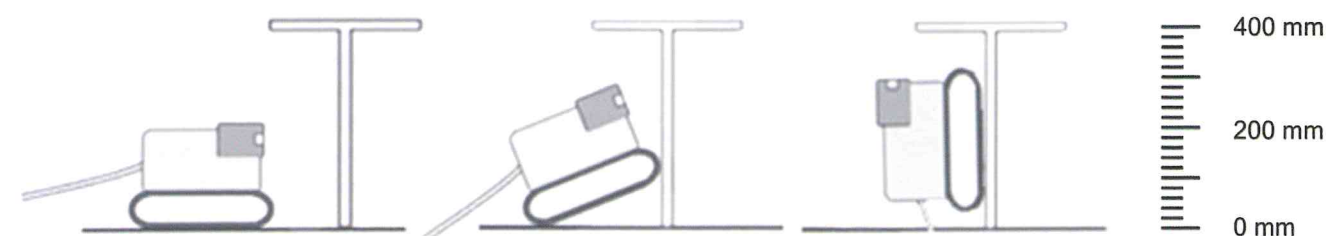


Figura 8 - Schema dei movimenti tipici dei crawler su rinforzo a T saldato su una lamiera.
Figure 8 - Sketch of typical crawler movements in way of a T-stiffener welded on a plate.

5.3 Specific tests: crawlers' abilities trials

Another part of the test protocols developed in the UNIGE laboratories concerns trials aimed at testing specific RAS abilities to collect information under particularly challenging conditions.

The philosophy of this section of the testing facility is to design a complex experimental set-up, simulating as much as possible a real inspection with particular structural geometries, lighting, environment, ventilation, humidity and different conditions of the structure surface to be inspected, which can compromise the functions of the RAS (e.g. because of presence of corrosion, defects, dust, oil, water, or any other features impairing the proper functioning of the robotic system).

Each conceived trial provides to test one or more abilities of the RAS by changing systematically selected parameters in the test configuration to know to what extent they affect the inspection.

Designed trials shall assess the robustness of the robots to external disturbances in performing specific tasks such as obstacle crossing, adhesion to the surface and recognition of position, quality and accuracy of gathered information, e.g. photos and videos, etc. by evaluating the time taken to carry out each mission as well as the quality of the inspection outcome.

As a typical example, currently the challenges for the crawlers are to climb over obstacles and to move on tilted and dirty panels, since they need a flat steel surface large enough to stand and slide on. It could be hard for this type of RAS to reach and to inspect some reinforced structural parts (e.g. the lower faceplate surface of the stiffeners as shown in Fig. 8).

For this reason, a specific test was developed where, by changing the height of the obstacles, i.e. of three different typical stiffening members of ship and namely bulb profile, "T" shaped, "L" shaped stiffeners, different situations are simulated in which the crawler should inspect and possibly take gauging in selected points of the structure. In this test, the crawler starts from a flat surface, approach the obstacle and attempt to overcome it. The obstacle can be considered crossed if the crawler reaches the flat surface on the other side of the obstacle without external actions with all the wheels or in general the points of contact with the structure (see Fig. 9).

mente ed elaborati a bordo del robot senza comunicazione con un'infrastruttura esterna (ad esempio sistemi satellitari GPS). Come accennato in precedenza, anche la compatibilità elettromagnetica di tali sistemi deve essere verificata nell'impianto di prova (testing facility).

Nei protocolli di prova descritti in precedenza, le piattaforme RAS devono raggiungere i way-point in una data sequenza e seguire percorsi specifici affrontando sfide, ostacoli e disturbi diversi. Mentre si sposta da un punto all'altro il robot, analogamente ai surveyor umani, raccoglie dati utili per la valutazione strutturale: cioè quando viene raggiunto un punto specifico, il robot (o surveyor) deve svolgere i compiti relativi a rilevare e caratterizzare i difetti strutturali in quello specifico punto. Generalmente i report narrativi realizzati dall'uomo contengono una quantità limitata di dati già pre-elaborati, se paragonati a quanto può essere acquisito da un sistema digitale, che invece è un'enorme mole di informazioni grezze da elaborare ulteriormente a posteriori.

I way-point sono stati collocati all'interno della struttura di prova in posizioni significative a seconda dei requisiti dei regolamenti attuali e in base alla pratica di ispezione corrente (ad esempio, aree critiche all'interno della stiva di una nave portarinfuse, come definito nei requisiti unificati IACS per le ispezioni come Z10.1 e Z10.2, (Rizzo, 2011), (IACS UR Z10.1, 2010), (IACS UR Z10.2, 2015). Per il momento, in sintesi, i protocolli di prova simulano l'approccio umano all'ispezione.

Al fine di soddisfare la necessità di protocolli di prova standardizzati, ogni punto è identificato da un marker posto sulla struttura (Figura 7). I punti di controllo sono stati suddivisi in famiglie, classificati in base alla tipologia di zona della nave (ad esempio stiva o cisterna di zavorra), alla posizione (ad esempio su una lamiera o su rinforzi), rilevando accuratamente la loro posizione effettiva nel modulo principale della struttura di prova e definendo la difficoltà di raggiungere il punto (facile, medio, difficile). La categorizzazione è stata effettuata con il supporto di un surveyor esperto (umano), utilizzando la stessa descrizione data per identificare simili punti a bordo nei rapporti narrativi d'ispezione (tipicamente, contare il numero di rinforzi da un punto di riferimento e/o definire l'altezza dal ponte, ecc. Ad esempio, un ispettore di una società di clas-



Figura 9 - Prova superamento ostacoli. I crawler dovrebbero attraversare le travi per ispezionare punti selezionati della struttura, simulando diverse situazioni con diverse altezze degli ostacoli.
Figure 9 - Obstacle Crossing. Crawlers should cross the beams to inspect selected points of the structure, by simulating different situations changing the height of the obstacles.

It was noted during trials that, in case the faceplate surface is not offering sufficient space to the RAS, to overcome the obstacle it is needed to select an alternative and likely longer path, obviously increasing inspection time. In some cases, the RAS is even not able to reach the target point. The test results are expressed as Boolean variables (yes/no), beside the duration of inspection, which is considered, as previously mentioned, an appropriate all-purpose quantitative measure of the inspection effectiveness.

Another typical challenge for crawlers and climbing robots in general is to stand still without slipping or moving on tilted surfaces with deposits like salt, dust, paint, rust, flakes of coating or oil. The behaviour of the RAS in the aforementioned surface conditions is tested on a structure designed and built on purpose fitted with two tiltable planes and a fixed horizontal one (see Fig. 10). A set of plates characterized by various coating and degradation conditions is available, thus providing a range of simulation scenarios, beside the tilting angle of the surfaces.

Moreover, the crawler should be able to measure the thick-

sifica scriverebbe in un rapporto di visita: "rilevata cricca sul piede della squadra della 3° costola del fianco a prora della paratia poppiera della stiva n. 3, circa 0,5 m sopra la lamiera superiore del cassonetto basso").

Per garantire l'efficienza delle metodologie utilizzate, per ogni configurazione, la piattaforma RAS fornirà dati da confrontare con i risultati ottenuti dal surveyor umano, a parità di condizioni. Dopo le prime prove effettuate, tuttavia, emerge che esiste il potenziale per un ulteriore sviluppo della pratica ispettiva, ampliando i dati acquisiti e fornendo quindi informazioni più accurate e dettagliate per la successiva valutazione strutturale. Infatti, l'ego-motion delle piattaforme RAS è ottenuto da algoritmi ben definiti che possono essere integrati con database di difetti rilevati.

Mentre i surveyor umani fanno affidamento sulle proprie capacità ed esperienze per ispezionare solo alcuni punti selezionati, che probabilmente rappresentano una parte molto piccola del dominio strutturale effettivo da ispezionare, una tecnologia RAS è in grado di scansionare una parte molto



Figura 10 - Prova di adesione. I crawler devono stare fermi senza scivolare o muoversi su superfici inclinate con depositi, misurando lo spessore delle lamiere ad ogni punto indicato.
Figure 10 - Adhesion Test. Crawlers should stand still without slipping or moving on tilted surfaces with deposits, measuring the thickness of the plates at each step.

ness of the surfaces, with or without deposit, even when the slope is changed.

In this case, the RAS assessment is not evaluated in terms of inspection time, rather as ability to face a wider and wider range of different scenarios of increasing complexity. During these trials, it is also worth noting whether the crawler damages or not the surface coating under inspection, due to the magnetic contact force required to operate on the inclined surfaces.

5.4 Specific tests: aerial drones' abilities trials

Aerial drones, unlike crawlers, are not affected by contact problems. However, since their main task is visual inspection by means of cameras, quality level of collected images need to be assessed. The task could be compromised by external disturbances like humidity, lighting conditions, air turbulence, beside RAS position and path. In this case, the test set-up is made up by several fans surrounding the testing area and a frame where lights and nebulizers are placed (see Fig. 11).

The drones should fly in the testing area, taking pictures of target structural details suitably placed in selected points, avoiding motion blur and other image deficiencies. Especially in this test, RAS pilot skills are crucial: as a matter of facts, the pilot must select the most convenient viewpoint to take the picture taking into account disturbances as well as goals of the mission.

It was noted in the trials that drones' inspection efficiency is generally affected by light painted or varnished surfaces that reflect its own light impairing taken images and by uni-

più grande alla ricerca di difetti. Probabilmente, questo è il modo per bilanciare la limitata esperienza nell'esecuzione di ispezioni assistite da tecnologie RAS.

Come affermato in precedenza, le piattaforme RAS non sono completamente autonome nel senso che necessitano di un qualche tipo di istruzione, ad esempio un percorso da seguire prefissato in anticipo. In linea di principio, non è necessario il pilotaggio per una piattaforma RAS tecnologicamente avanzata durante una missione predefinita, anche se un surveyor può richiedere lo zoom o la visione da diversi punti di vista in tempo reale per valutare in modo affidabile le strutture. Quindi, l'intervento umano è sempre in qualche modo necessario.

Sarebbero inoltre necessari protocolli per formare i surveyor che utilizzeranno le immagini, i video e altri risultati acquisiti con tecnologie RAS. Questo per garantire che il surveyor abbia una chiara comprensione dei punti di forza e dei limiti della tecnologia applicata. Inoltre, tali protocolli dovrebbero essere sviluppati e diventare specifici per le diverse tipologie di robot per garantire la standardizzazione dei test.

5.3 Prove specifiche: prove di abilità dei crawler

Un'altra parte dei protocolli di prova sviluppati nei laboratori UNIGE riguarda le prove volte a testare le capacità specifiche per raccogliere informazioni in condizioni particolarmente difficili.

La filosofia di questa sezione della struttura di prova è quella di progettare un complesso assetto sperimentale, simu-

form wall surfaces as long as no detection features are present allowing localization of the parts reported in the photos or videos. Assessment of such aspects were carried out also by placing reflective surfaces in the testing areas of the main module of the testing facility.

In this case the inspection duration time is again a measure of the inspection effectiveness along with the quality of image and videos. The pilot ability is more than essential: in one case during trials the pilot decided to land on structural targets and then to take pictures not in flying conditions, which was not foreseen when test protocols were developed. This demonstrates that as for humans, RAS too face the challenges of inspection using different approaches depending on their own specific features and capabilities.

Owing the experience of the first trials carried out, for both aerial drones and crawler, it was suggested to proof RAS abilities to take pictures/gauges of vibrating structures at typical frequencies and motion amplitudes of ship structure, e.g. as those induced by machinery.

6. Conclusions

Inspections are fundamental tasks required in the management of ships. They are currently performed by human surveyors, using rather basic sensors like cameras and ultrasonic thickness gauges and only occasionally other non-destructive testing equipment. It can be affirmed that mostly inspections are currently based on the five human senses, i.e. touch, sight, hearing, smell, and taste, beside surveyor own skills, experience and engineering judgment.

It is usually neither possible nor expected that a survey is extended to the entire structure of the vessel and only the most critical parts or those with higher probability of damage are inspected on the basis of earlier inspection and according to rule requirements derived from decades of ship management history. Consequently, the traditional inspection approach is rather expensive, time consuming and, even if surveyors are trained according to standards (e.g. IACS procedures), based on subjective evaluations, coming from their own experience to a certain extent. This is also due to the intrinsic uncertainties of data collected during human inspections. Rather, during RAS assisted inspections, more quantitative data are gathered, with generally low scatter. Though, needing much more complex post-processing and elaboration, to be properly defined and agreed.

However, as stated in IACS Rec. 42 "The results of the surveys by remote inspection techniques, when being used towards the crediting of surveys, are to be acceptable to the attending Surveyor.", who has in any case the last word and must formulate a repair plan with the shipyard.

The development of latest generation digital technologies, like Robotics and Autonomous Systems, may improve ship inspections widening aims and scope of surveys, provided that inspection approach and procedures are properly updated. Moreover, it may help in making the assessment more

lando il più possibile un collaudo reale con particolari geometrie strutturali, illuminazione, ambiente, ventilazione, umidità e diverse condizioni della superficie della struttura da ispezionare, che possono compromettere le funzioni del RAS (ad esempio a causa della presenza di corrosione, difetti, polvere, olio, acqua o qualsiasi altra caratteristica che comprometta il corretto funzionamento del sistema robotico).

Ciascuna sperimentazione concepita prevede di testare una o più abilità del RAS modificando i parametri selezionati sistematicamente nella configurazione di prova per sapere in che misura essi influenzino l'ispezione.

Le prove progettate devono valutare la robustezza dei robot nei confronti di disturbi esterni nell'esecuzione di compiti specifici come l'attraversamento di ostacoli, l'adesione alla superficie e il riconoscimento della posizione, la qualità e l'accuratezza delle informazioni raccolte, ad esempio foto e video, ecc. valutando il tempo impiegato per svolgere ogni missione e la qualità dell'esito dell'ispezione.

A titolo di esempio tipico, attualmente le sfide per i crawler sono scavalcare ostacoli e muoversi su pannelli inclinati e sporchi, poiché hanno bisogno di una superficie piana in acciaio abbastanza grande per rimanere fermi o muoversi. Potrebbe essere difficile per questo tipo di RAS raggiungere e ispezionare alcune parti strutturali rinforzate (ad esempio la superficie inferiore della piattabanda dei rinforzi, come mostrato nella Figura 8).

Per questo motivo è stata sviluppata una prova specifica dove, variando l'altezza degli ostacoli, cioè di tre differenti elementi di irrigidimento tipici di una nave e precisamente il piatto a bulbo, irrigidimenti a "T" ed a "L", si simulano diverse situazioni che il crawler deve ispezionare ed in cui eventualmente effettuare misurazioni in punti selezionati della struttura. In questo test, il crawler parte da una superficie piana, si avvicina all'ostacolo e tenta di superarlo. L'ostacolo si può considerare attraversato se il crawler raggiunge la superficie piana dall'altro lato dell'ostacolo senza azioni esterne con tutte le ruote o in generale i punti di contatto con la struttura (Figura 9).

Durante le prove è stato notato che, nel caso in cui la superficie frontale non offra spazio sufficiente alla piattaforma RAS, per superare l'ostacolo è necessario selezionare un percorso alternativo e probabilmente più lungo, aumentando ovviamente il tempo di ispezione. In alcuni casi, il robot non è nemmeno in grado di raggiungere il punto di destinazione. I risultati della prova sono espressi come variabili booleane (sì / no), oltre alla durata dell'ispezione, che è considerata, come accennato in precedenza, una misura quantitativa adatta a definire in ogni caso l'efficacia dell'ispezione.

Un'altra sfida tipica per i crawler e i robot arrampicatori in generale è quella di rimanere fermi senza scivolare o muoversi su superfici inclinate con depositi come sale, polvere, vernice, ruggine, scaglie di rivestimento o olio.

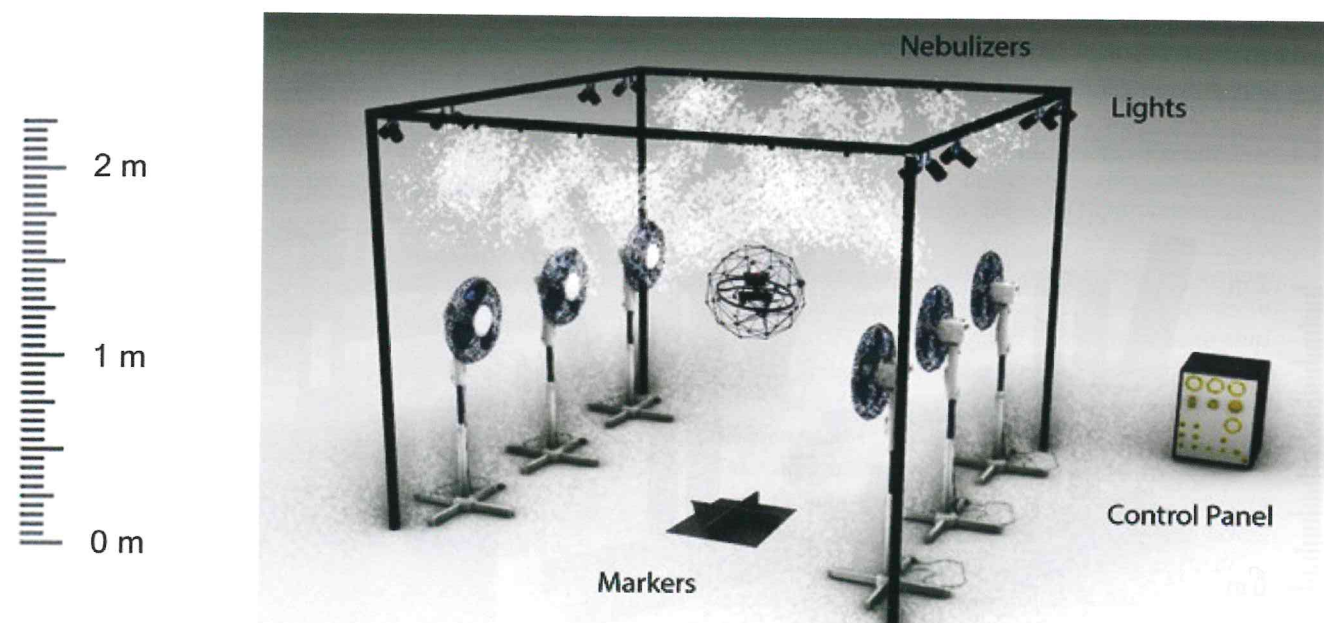


Figura 11 - Prova abilità aeree. I droni dovrebbero essere in grado di produrre immagini calibrate di bersagli in condizioni di flusso instabile, con vento turbolento (velocità massima di 2 m/s) e diverse configurazioni di luce e nebulizzazione di acqua.

Figure 11 - Flight Robustness. Drones should be able to produce calibrated images of the patterns in unsteady flow conditions, with turbulence wind (maximum gust of 2 m/s) and different configurations of light and nebulization.

objective by acquiring more and more extensive quantitative data, to be automatically elaborated and processed, thus not only identifying the degradation level of the structure but also quantifying it more accurately.

Survey time and preparation costs (e.g. for stagings) can be significantly reduced, still maintaining the quality of the inspection at least equivalent to the traditional ones and improving safety at the same time. But there is potential beyond this first step.

Environments to be inspected and requirements of the surveys are however very different: while many and diversified robotic technologies for automated inspections are being developed, a specific environment to test and assess RAS abilities according to well established standards, specifically devoted to ship and marine structures, is requested.

The testing facility already built and under continuous development in Genoa University has the aim to simulate as much as possible real inspections by proposing structures and typical conditions of an operational ship, stimulating robotics industry towards new potential markets.

The intention is to create, around the testing facility, a competence centre where trials environment and test protocols specific for RAS intended to be used in the inspection of ship and offshore structures are continuously developed along with the RAS. At the same time, the testing facility is aimed at becoming the training and certification environment for the surveyors and the service suppliers working within the shipping community, bearing in mind that the first trials already proved that team working including RAS, their pilots and the surveyor is necessary.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 779776. Its support is gratefully acknowledged.

References

- [1] RINA, Amendments to the Rules for the Certification of Service Suppliers, Doc. 3.2, 16 November 2018, Registro Italiano Navale, Genova, Italia.
- [2] Caldwell, R., 2017. Hull Inspection Techniques and Strategy - Remote Inspection Developments. Society of Petroleum Engineers - SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, Aberdeen, United Kingdom, 5 - 8 September 2017.
- [3] Huang, Haocai, Li, Danhua, Zhao, Xue, Chen, Xianlei, Liu, Shuyu, Leng, Jianxing, Yan, Wei, 2017.

Il comportamento del robot nelle suddette condizioni di superficie è testato su una struttura progettata e costruita appositamente dotata di due piani ad inclinazione variabile ed uno orizzontale fisso (Figura 10). È disponibile un set di lastre caratterizzate da varie condizioni di rivestimento e degrado, che consente così una gamma di scenari di simulazione, oltre all'angolo di inclinazione delle superfici. Inoltre, il cingolato dovrebbe essere in grado di misurare lo spessore delle superfici, con o senza deposito, anche quando la pendenza viene modificata.

In questo caso, la valutazione della tecnologia RAS non viene stabilita in termini di tempo di ispezione, ma piuttosto come capacità di affrontare una gamma sempre più ampia di diversi scenari di crescente complessità. Durante queste prove vale anche la pena notare se la ruota o il cingolo danneggia o meno il rivestimento superficiale in esame, a causa della forza di contatto magnetica necessaria per operare sulle superfici inclinate.

In questo caso, la valutazione della tecnologia RAS non viene stabilita in termini di tempo di ispezione, ma piuttosto come capacità di affrontare una gamma sempre più ampia di diversi scenari di crescente complessità. Durante queste prove vale anche la pena notare se la ruota o il cingolo danneggia o meno il rivestimento superficiale in esame, a causa della forza di contatto magnetica necessaria per operare sulle superfici inclinate.

5.4 Prove specifiche: prove di abilità aeree dei RAS volanti

I droni aerei, a differenza dei crawler, non sono affetti da problemi di contatto. Tuttavia, poiché il loro compito principale è l'ispezione visiva mediante telecamere, è necessario valutare il livello di qualità delle immagini raccolte. Il compito potrebbe essere compromesso da disturbi esterni come umidità, condizioni di illuminazione, turbolenza dell'aria, oltre alla posizione e al percorso del drone. In questo caso, l'allestimento della prova è costituito da più ventilatori che circondano l'area di prova e da un telaio dove sono posizionate luci e nebulizzatori d'acqua (Figura 11).

I droni dovrebbero volare nell'area di prova, scattando foto di dettagli strutturali del bersaglio opportunamente posizionati in punti selezionati, evitando sfocature dovute al movimento e altre anomalie dell'immagine. Soprattutto in questa prova, le abilità del pilota sono cruciali: in effetti, il pilota deve selezionare il punto di vista più conveniente per scattare la foto tenendo conto dei disturbi e degli obiettivi della missione.

È stato osservato nelle prove che l'efficienza dell'ispezione eseguita mediante droni è generalmente influenzata da superfici verniciate con colore chiaro o lucido, che riflettono la luce alterando le immagini scattate e da ampie superfici uniformi quando non siano presenti caratteristiche di rilievo che consentano la localizzazione delle parti riportate nelle foto o video. La valutazione di tali aspetti è stata effettuata anche posizionando delle superfici riflettenti nelle aree di prova del modulo principale della struttura di prova. In questo caso, la durata dell'ispezione è ancora una misura dell'efficacia dell'ispezione insieme alla qualità delle immagini e dei video. L'abilità del pilota è più che essenziale: in un caso, durante le prove, il pilota ha deciso di atterrare direttamente sui bersagli e poi di scattare foto non in condizioni di volo, cosa non prevista quando sono stati sviluppati

Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding. Ocean. Eng. 131, 224 e 230.

- [4] Knapp, Sabine, Franses, PhH.B.F., 2006. Analysis of the Maritime Inspection Regimes - Are Ships Over-inspected. Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute, Econometric Institute Report.
- [5] IACS, No, Recommendation, Sep 2002. 78 Safe Use of Portable Ladders for Close-Up Surveys. International Association of Classification Societies, London, UK.
- [6] IACS, Recommendation No. 39 Safe Use of Rafts or Boats for Survey, Rev. 3 Mar 2009, International Association of Classification Societies, London, UK.
- [7] IACS, No, Recommendation, Mar 2014. 134 Boat Transfers Safe Practice. International Association of Classification Societies, London, UK.
- [8] IACS, Recommendation No. 140 Recommendation for Safe Precautions during Survey and Testing of Pressurized Systems, June 2015, International Association of Classification Societies, London, UK.
- [9] IACS, No, Recommendation, July 2015. 141 Guidelines for the Assessment of Safety Aspects at Workplace. International Association of Classification Societies, London, UK.
- [10] IACS, Recommendation No. 72 Confined Space Safe Practice, Corr. 1 Sep 2017, International Association of Classification Societies, London, UK.
- [11] IACS, Procedural Requirement No, Apr 2013. 37 Procedural Requirement for Confined Space Entry. International Association of Classification Societies, London, UK.
- [12] Ravina E., A Pneumatic Climbing Robot for Inspection Tasks, 10th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP07, May 21-23, 2007, Tampere, Finland.
- [13] Ravina E., Low cost pneumatronic unit for pipes inspection, ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, vol. 3, Istanbul, Turkey, July 12 e 14, 2010, Istanbul, Turkey.s.
- [14] Ravina E., Self-moving Pneumatic Unit for Ducts Inspection Tasks, 12th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'11, May 18-21, 2011, Tampere, Finland.
- [15] Ravina, E., 2012. Ducts Inspection by Means of Self-Moving Pneumatronic Robot, 11th Biennial ASME Conference on Engineering System Design and Analysis, ESDA, pp. 2 e 4. July 2012, Nantes, France.
- [16] Ravina, E., 2015. Self-moving Units for Inspection Tasks of Marine Structures and Plants, Intl. Conf. On Ships and Shipping Research, NAV. Lecco, Italy. June 24-26 2015.

i protocolli di prova. Ciò dimostra che, come per gli esseri umani, anche le tecnologie RAS devono affrontare le sfide dell'ispezione utilizzando approcci diversi a seconda delle proprie caratteristiche e capacità specifiche.

L'esperienza delle prime prove effettuate, sia per i droni aerei che per i crawler, suggerisce di prevedere tra i protocolli di prova anche la verifica delle capacità delle tecnologie RAS di scattare foto e di misurare le strutture quando vibrano a frequenze e con ampiezze tipiche della struttura delle navi, ad esempio quelle indotte dai macchinari.

6. Conclusioni

Le ispezioni sono attività fondamentali, richieste nella gestione delle navi. Attualmente sono eseguite da surveyor umani, utilizzando sensori piuttosto semplici come telecamere e misuratori di spessore ad ultrasuoni e solo occasionalmente altre apparecchiature per prove non distruttive. Si può affermare che la maggior parte delle ispezioni siano attualmente basate sui cinque sensi umani, ovvero tatto, vista, udito, olfatto e gusto, oltre alle capacità, all'esperienza ed alla sensibilità ingegneristica del surveyor.

Di solito non è né possibile né previsto che un rilievo sia esteso all'intera struttura della nave e solo le parti più critiche o quelle con maggiore probabilità di danneggiamento vengano ispezionate sulla base degli esiti di un'ispezione precedente e secondo i requisiti normativi definiti sulla scorta di un'esperienza di vari decenni nella gestione delle navi. Di conseguenza, l'approccio ispettivo tradizionale è piuttosto costoso, richiede tempo e è soggetto a valutazioni soggettive, provenienti in una certa misura dalla propria esperienza, sebbene i surveyor siano formati secondo standard (ad esempio procedure IACS). Ciò è dovuto anche alle incertezze intrinseche dei dati raccolti durante le ispezioni umane. Al contrario, durante le ispezioni assistite da tecnologie RAS, vengono raccolti più dati quantitativi, con una dispersione generalmente bassa. Tuttavia, necessitano di post-elaborazione ed elaborazione molto più complesse, da definire e concordare adeguatamente.

Tuttavia, come affermato in IACS Rec. 42: "I risultati dei rilievi con tecniche di ispezione a distanza, quando utilizzati per visite di classe, devono risultare accettabili per il surveyor incaricato", il quale ha quindi l'ultima parola e deve formulare un programma di riparazione di concerto con il cantiere.

Lo sviluppo di tecnologie digitali di ultima generazione, come la robotica ed i sistemi autonomi, può migliorare le ispezioni navali ampliando gli obiettivi e la portata delle indagini, a condizione che l'approccio e le procedure ispettive siano adeguatamente aggiornate e validate. Inoltre, può aiutare a rendere la valutazione più oggettiva acquisendo dati quantitativi sempre più ampi, da elaborare ed analizzare automaticamente, identificando così non solo il livello di degrado della struttura ma anche quantificandolo in modo più accurato.

- [17] Ravina, E., 2017. Team of pneumatic ASI-controlled climber robots for ship inspection. In: Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD, Italy. June 21 - 23 2017, Turin.
- [18] Ravina E., Concept Design of an Autonomous Mechatronic Unit for Inspection of Holds, Progress in the Analysis and Design of Marine Structures MARSTRUCT 2107, May 8 - 10 2017, Lisboa, Portugal.
- [19] IACS, Rec. 42 Guidelines for Use of Remote Inspection Techniques for Surveys, Rev. 2 June 2016, International Association of Classification Societies, London, UK. IACS, Rec 76 Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structure - Bulk Carriers, Corr. 1 Sept 2007, International Association of Classification Societies, London, UK.
- [20] LR, Remote Inspection Technique Systems (RITS), Assessment Standard for Use on LR Class Surveys of Steel Structure, October 2018, Lloyd's Register of Shipping, London, UK.
- [21] Rizzo, C.M., 2011. Life cycle of ships and offshore structures-inspection and survey of ship structures: an introduction. A Rational Overview of Ships Inspection and Maintenance Regime. In: Ships, Offshore Structure (Eds.), Jeom Kee Paik, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO. EOLSS Publishers, Oxford, UK. <http://www.eolss.net>.
- [22] Rizzo, C.M., Paik, J.K., Brennan, F., Carlsen, C.A., Daley, C., Garbatov, Y., Ivanov, L., Cerup-Simonsen, B., Yamamoto, N., Zhuang, H.Z., 2007. Current practices and recent advances in condition assessment of aged ships. Ships Offshore Struct. 2 (3), 261 e 271. <https://doi.org/10.1080/17445300701423486>.
- [23] Rizzo, C.M., 2008. Inspection of Aged Ships and Offshore Structures, Condition Assessment of Aged Structures. In: Paik, J.K., Melchers, R.E. (Eds.), Ch. 13. Woodhead publishing Ltd., pp. 367 e 406, 978 1 84569 334 3.
- [24] ABS, March 2018. Guidance Notes on Using Unmanned Aerial Vehicles. American Bureau of Shipping, Houston, TX USA.
- [25] Wen, F., Wölling, J., McSweeney, K., Gu, H., 2018. Unmanned aerial vehicles for survey of marine and offshore structures: a classification organization's view-point and experience. In: Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, vol. 5, pp. 3737 e 3745. Houston, United States, 30 April 2018 through 3 May 2018.

I tempi di rilevamento e i costi di preparazione (ad esempio per allestimenti) possono essere ridotti in modo significativo, mantenendo comunque la qualità dell'ispezione almeno equivalente a quelle tradizionali e migliorando allo stesso tempo la sicurezza. Oltre questo primo passo obbligato, la tecnologia RAS apre comunque nuovi orizzonti sugli sviluppi di futuri metodi di ispezione.

Gli ambienti da ispezionare ed i requisiti dei rilievi sono tuttavia molto diversi: mentre sono in fase di sviluppo le diversificate tecnologie robotiche per le ispezioni automatizzate, è richiesto un ambiente specifico per testare e valutare le capacità RAS secondo standard ben consolidati, specificatamente dedicati alle navi e alle strutture marine. La testing facility già realizzata e in continuo sviluppo presso l'Università di Genova ha l'obiettivo di simulare il più possibile ispezioni reali, proponendo strutture e condizioni tipiche di una nave operativa, stimolando l'industria della robotica verso nuovi potenziali mercati.

L'intenzione è quella di creare, attorno alla struttura di prova, un centro di competenza in cui l'ambiente ed i protocolli di prova specifici per RAS destinati ad essere utilizzati nell'ispezione di navi e strutture offshore siano continuamente sviluppati insieme alle tecnologie stesse. Allo stesso tempo, la struttura di prova mira a diventare l'ambiente di formazione e certificazione per i surveyor ed i fornitori di servizi che lavorano all'interno della comunità dell'industria marittima, tenendo presente che le prime prove hanno già dimostrato che per ogni evento ispettivo è necessario costituire un gruppo di lavoro che comprende le piattaforme RAS, i loro piloti ed il surveyor navale.

Conflitto di interessi

Gli autori dichiarano di non avere interessi finanziari o rapporti personali in competizione noti che potrebbero influenzare il lavoro riportato in questo documento.

Ringraziamenti

Questo lavoro ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea ROBINS nell'ambito della convenzione di sovvenzione n. 779776. Il contributo è riconosciuto con gratitudine.

- [26] IACS, UR, Feb 2010. Z10.1 Hull Surveys of Oil Tankers, Rev.17. <http://www.iacs.org.uk/download/4502>.
- [27] IACS, UR, 2015. Z10.2 Hull surveys of bulk carriers. Rev. 32. <http://www.iacs.org.uk/download/4504>.
- [28] IACS, 18 Jan 2011. URZ7 Hull Classification Surveys, Rev. <http://www.iacs.org.uk/download/4562>.



Italy
....from 1958

CGM CIGIEMME S.p.A.

Controlli Non Distruttivi - Non Destructive Testing

Dal 1958...

La vostra qualità affidata alla nostra esperienza



LIQUIDI PENETRANTI

Anche nel controllo con Liquidi Penetranti CGM CIGIEMME è in grado di offrire soluzioni complete: dalla semplice attrezzatura all'impianto automatico, dai prodotti di consumo fluorescenti o a contrasto di colore (realizzati in proprio o su licenza) agli accessori.



MAGNETOSCOPIA

Sviluppo, progettazione e realizzazione dell'intera gamma: dai piccoli apparecchi portatili fino agli impianti automatici in linea, dai prodotti di rilevamento agli accessori e test di controllo.



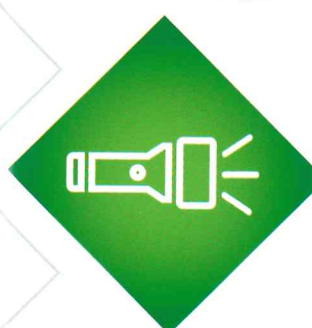
CONSUMABILI

CGM CIGIEMME produce l'intera gamma di prodotti sia per il controllo con le particelle magnetiche che per il controllo con Liquidi Penetranti.



ACCESSORI

CGM CIGIEMME produce l'intera gamma di prodotti sia per il controllo con le particelle magnetiche che per il controllo con Liquidi Penetranti.



SERVICE

Un Team di tecnici specializzati garantiscono un service di altissima qualità in tutto il mondo.

www.cgm-cigiemme.it

CGM CIGIEMME S.p.A.
Via Adda, 21 - 20090 Opera (MI)
Tel. +39 02.57600400
Fax. +39 02.57603618
cgm@cgm-cigiemme.it

