

Fotografia i Visió Submarina: Revisant els Avanços més Recents

Francisco Bonin-Font, Antoni Burguera, Gabriel Oliver
Universitat de les Illes Balears.
Cra de Valldemossa, km 7.5, 07122, Palma de Mallorca, Spain
{francisco.bonin,antoni.burguera,goliver}@uib.es

Resum—Una de les tasques recomanades prèvies al inici del disseny d'una infraestructura per visió o adquisició de vídeo destinada a un vehicle submarí es, sens dubte, explorar les tècniques empleades en els darrers anys en sistemes de visió submarina. La informació recollida en aquest article és un resum d'un dels treballs d'investigació duts a terme dins del projecte Visual-DPI 2008-06548-C03-02, per part del grup de Sistemes, Robòtica i Visió. Aquest treball revisa els darrers desenvolupaments i estudis realitzats en visió submarina, tant per Vehicles Remotament Operats (ROV), com per estacions estàtiques o Vehicles Autònoms Submarins (AUV). També es fa una petita introducció a les tècniques que utilitzen llum polaritzada per millorar la qualitat de les imatges preses sota l'aigua.

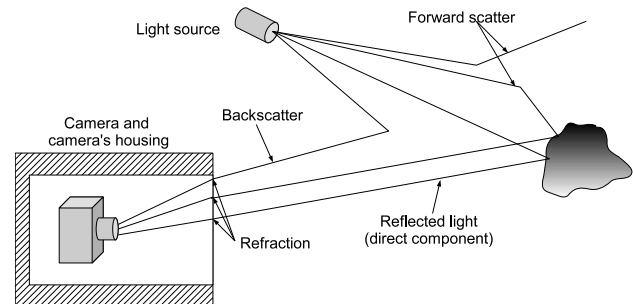


Figura 1. Exemple de *backscatter*, *forward scatter* i refracció.

I. EL PROBLEMA DE LA VISIÓ EN ENTORNS SUBMARINS

Quan les ones electromagnètiques es propaguen dins l'aigua interactuen amb ella i amb els materials dissolts o que estan en suspensió. Les ones electromagnètiques s'atenuen proporcionalment amb la distància que recorren. Hi ha estudis que descriuen aquest procés, per exemple, [8] o [28]. La atenuació global que pateix la llum dins l'aigua depèn, bàsicament, de quatre processos: refracció, dispersió (*scatter*), absorció i fluorescència.

En la *refracció*, el rajol de llum canvia de direcció de propagació quan passen d'un mitjà a un altre de diferent densitat (en el nostre cas, entre l'aire i l'aigua). En una càmera submarina, hi ha refracció entre l'aire de dins la càmera i l'aigua de fora. La refracció provoca que les dimensions dels objectes propers es percebin majors del que realment es veurien en aire, mentre que els objectes llunyans aparenten ser més petits del que es veurien en aire. Aquest efecte es pot solucionar calibrant la càmera.

La *dispersió*, coneguda amb el terme anglès *scatter* es produeix quan els fotons de la llum es reflecteixen en diverses direccions. L'*scatter* pot ser *forward scatter* o *backward scatter*. El *forward scatter* es produeix quan l'angle en el canvi de direcció de la llum és petit, i per lo tant la llum continua la seva trajectòria cap a davant. Aquest fenomen produeix pèrdua de nitidesa en la imatge. El *backscatter* es produeix quan els fotons es reflecteixen de tornada cap el focus emissor abans d'arribar als objectes il·luminats. Aquest reflex o *scatter* es produeix degut a la gran quantitat de partícules que poden haver dins l'aigua entre l'emissor de llum i els objectes de

l'escena. L'efecte que produeix sobre la imatge és de punts blancs o zones més brillants. No obstant, el problema més greu que genera l'*scatter* és la pèrdua de contrast, i aquest és un dels problemes més importants en la visió submarina.

Tant l'efecte del *backscatter* com el del *forward scatter* depenen del volum d'aigua il·luminada dins del camp de visió de la càmera. En general, l'efecte negatiu de l'*scatter* en mitjans marins augmenta amb la distància que hi ha entre la càmera i els objectes il·luminats.

Els efectes globals del *backscatter*, *forward scatter* i de la refracció s'il·lustren en la figura 1.

L'*absorció* és la causa de que part de la llum emesa pel sistema de il·luminació es perdi i no arribi al conjunt de l'escena a fotografiar. Això genera dos problemes importants: i) s'imposa l'ús de més llum artificial i/o més potent, limitant considerablement la distància a la que podem percebre els objectes, ii) els components espectrals de la llum s'absorbeixen de forma diferent ja que, per exemple, en aigües clares, la llum amb majors longituds d'ona s'absorbeix abans que altres llums amb longituds d'ona menors. En aigües més enfangades o en aigües amb altes concentracions de plankton, la llum vermella (major longitud d'ona) es transmet millor (s'absorbeix menys) que la llum blava.

Finalment, la *fluorescència* fa referència a la emissió de llum per part d'un objecte que prèviament ha absorbit llum a una longitud d'ona diferent a la que posteriorment emet. En la majoria dels casos, la llum emesa té majors longituds d'ona que la absorbida.

El paràmetre que engloba i caracteritza la atenuació global que pateix la llum dins l'aigua es conegut com *distància d'atenuació*, i es determina calculant la distància a la que la intensitat de la llum cau en un factor de $1/e$. La distància de

atenuació és la distància en la que s'ha perdut aproximadament un 64% de la llum emesa. La visibilitat en l'aigua es manté entre una i dos distàncies de atenuació, lo que significa que la visibilitat es bona entre 30 i 60 metres en aigües clares, entre 6 i 15 metres en aigües profundes i entre 1.5 a 6 metres en aigües pròximes a la costa.

II. TÈCNIQUES DE IL·LUMINACIÓ

A. Formes d'il·luminar L'Escena

La llum natural (per exemple, la llum solar), s'atenueja quasi completament abans d'arribar a profunditats significatives. Per altre banda, les fonts de llum artificial normalment il·luminen molt el centre de la escena però deixen els contorns lleugerament obscurs. Aquests problemes poden ser solucionats utilitzant diferents fonts de llum situades estratègicament.

Des de el punt de vista de la manera com s'il·lumina un entorn, els sistemes de visió submarina poden ser classificats en funció de varis conceptes:

II-luminació Passiva: les escenes son il·luminades per alguna font de llum natural (la llum solar) o per alguna font de llum no específicament situada per assistir al sistema de visió.

II-luminació Activa: la llum generada específicament a partir de fonts afegides, com per exemple, llum emesa per focus, llum estroboscòpica, raig laser, etc... Els sistemes d'il·luminació artificials milloren la qualitat de les imatges preses a majors distàncies.

Light Stripe Range Scanning (LSRS) : L'entorn que es vol filmar s'escaneja amb la llum que emet un diode laser formant un pla que il·lumina tota l'escena. El pla de llum que es genera és perpendicular a la superfície dels objectes a il·luminar [15], [27].

Photometric Stereo : Els vectors normals a les superfícies dels diferents objectes d'una escena es poden calcular prenent varies imatges des de un mateix punt de vista però il·luminant l'escena des de diferents direccions o posicions [18], [15].

Synchronous scanning systems : En aquests sistemes, la font de llum emet una col·lecció de rajos pràcticament paral·lels on cada raig te una amplada mínima (per exemple un feix de rajos laser). Aquest tipus de rajos causen mínim *scatter* i milloren considerablement el contrast de les imatges.

Range Gated Systems : La font de il·luminació emet polsos de llum i la càmera capta la llum únicament durant aquells instants de temps en els que els polsos reflectits pels objectes retornen a ella. Aquesta tècnica redueix considerablement l'efecte nociu del *backscatter* i augmenta el contrast de forma significativa [9], [26].

B. On Situem la Font de Llum ?

Quan s'utilitzen sistemes d'il·luminació convencionals, la quantitat de *backscatter* depèn del volum d'aigua on el feix de llum i el camp de visió de la càmera intersecten. Per aquesta raó, se sol separar la font de llum de la càmera el màxim possible per tal de reduir al màxim l'esmentat volum d'aigua resultant de la intersecció d'ambdós camps.

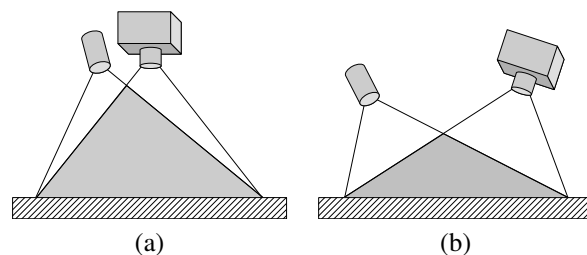


Figura 2. (a) Sistema Convencional (b) Augment en la separació entre la càmera i la font de llum. L'àrea gris representa el volum d'aigua on el *backscatter* apareix

La figura 2-a mostra un exemple d'un cert volum d'aigua generant *scatter* quan la càmera i la font de llum estan properes, i la figura 2-b mostra la diferència quan s'incrementa la distància entre la font de llum i la càmera [10]. Aquesta configuració fa possible l'obtenció d'imatges amb una claredat òptima de fins a 2 distàncies d'atenuació. Si la font de llum es separa de la càmera al màxim possible, (en vehicles submarins petits, de 3 a 5 meters), es poden obtenir imatges amb claredat molt bona fins a 3 distàncies d'atenuació, d'una forma simple i barata. Els estudis presentats en [10] avaluen el contrast a les imatges per diferents separacions entre la càmera i la font de llum, movent la font tant vertical com horitzontalment. Jaffe demostra que al separar la font de llum horitzontalment, el contrast augmenta, de forma significativa fins a separacions d'entre 10 i 20 metres, i tendeix a decaure per separacions més grans. El contrast també augmenta quan es separa la font de llum verticalment, però de forma molt menys significativa que quan es separa horitzontalment. Si els vehicles no permeten separacions de l'ordre de les esmentades, hi ha la possibilitat d'utilitzar dos vehicles navegant de forma coordinada, un per carregar la càmera i un altre per dur les fonts de llum [11].

C. Sistemes de Il·luminació Comercials

Tot seguit es relacionen diferents tipus d'emissors de llum amb diferents nivells d'eficàcia (lumens/Watts). Els sistemes de visió submarins han evolucionat utilitzant fonts de llum artificial cada cop més eficients:

Halògens : Utilitzen un filament incandescent per a encendre gas halògen. Aquestes llums són un 30% de mitjana més blanca i brillant que les bombetes incandescentes, però consumeixen menys watts de potència (augmenta la eficiència en lumens/watt). El seu temps de vida és molt superior al de les bombetes incandescentes.

HID (High Intensity Discharge) : Utilitzen una descàrrega elèctrica entre dos electrodes per encendre gas xenon confinat dins un tub de vidre segellat. Emeten llum blava/blanca amb una longitud d'ona propera a la llum natural. La llum blanca que produeixen aquests emissors es propaga dins l'aigua a distàncies més llargues que llums amb altres longituds d'ona. Aquestes fonts de llum duren uns 10 cops més i son molt més efectives que els halògens. S'utilitzen en ROVs.

HMI (Hydrargyrum medium-arc Iodide lamp) : En aquestes llums, el recipient de vidre s'omple de vapor de mercuri, que s'excita també aplicant una descàrrega elèctrica

entre dos electrodos. La seva eficàcia és similar a la dels HIDs. Son molt útils i molt utilitzats en la indústria fotogràfica, i a més des de 1996 s'han utilitzat en fotografia submarina ja que produeixen llum fins a 4 vegades més brillant que els incandescents. Són cares i en general consumeixen molt, però la llum que donen es immillorable per ROVs.

HIF (High Intensity Fluorescent) : En molts casos, aquests sistemes són més eficients que els HIDs, són més fàcilment regulables i generen menys zones obscures, amb lo que il·luminen areas més extenses que un HID. S'utilitzen en aplicacions marines per atreure bancs de peixos, però molt rarament en vehicles submarins.

LEDs : Aquests sistemes s'alimenten amb tensió (12V-24V) i corrent contínua. Consumeixen 4 vegades menys potència que la resta de sistemes descrits fins ara i generen molt menys calor. Poden emetre llum d'un ampli espectre de longituds d'ona, duren molt més que els halògens i són més efectius que els HID. Són més cars que la resta, però val la pena aprofitar el seu baix consum, sobretot en vehicles autònoms equipats amb bateries.

Infrarojos : La llum infraroja té una longitud d'ona entre 700nm i 1mm. aquest tipus de llum s'utilitza molt per filmar o captar imatges de nit i en algunes aplicacions submarines [13], [22]. Les càmeres utilitzades han d'estar preparades per captar llum infraroja. La llum amb aquestes longituds d'ona no es visible, per això la fa ideal per gravar imatges de fauna submarina, sense que aquesta es vegi molestada per la llum.

Laser : La llum laser presenta unes longituds d'ona entre 350nm i 630nm. Aquest tipus de llum s'utilitza per filmar a llargues distàncies, ja que permeten il·luminar a 5, 6 o 7 distàncies d'atenuació en front de les 2, 3 o 4 distàncies que permeten les llums convencionals. El laser permet el càlcul de les distàncies dels objectes il·luminats a la càmera. El laser té bàsicament dos problemes: i) els emissors laser són considerablement més cars que els HID, LEDs or infrarojos, i 2) generen un feix de llum molt estret, per lo que es fa necessari escanejar tot l'entorn per treure una imatge, disminuint el *frame rate* (quantitat d'imatges preses per segon). Les font laser poden emetre llum contínua o be en polsos. Il·luminar l'escena amb polsos permet distingir l'*scatter* de la llum reflectida pels objectes de l'escena. Algunes de les tècniques que s'utilitzen amb llum laser són: a) Laser Range-Gating (LRG), on s'emeten polsos de 6ns aproximadament, per lo tant, utilitzant un receptor de polsos amb una resolució temporal suficientment ajustable es pot filtrar tota aquella llum que no siguin polsos a la mateixa freqüència de la emesa [24], [32], b) Laser Line Scan (LLS), tècnica que consisteix en escanejar l'entorn amb un raig laser en la direcció perpendicular a la plataforma que aguanta el sensor, i llençant feixos a mesura que el vehicle es mou [2], [5], [4], c) tècniques de modulació/demodulació, on es filtren totes aquelles components que no tenen la mateixa modulació que la llum emesa [3], [14].

III. ALGUNES INFRAESTRUCTURES I VEHICLES SUBMARINS QUE UTILITZEN VISIÓ

A continuació esmentem algunes de les infraestructures i vehicles submarins desenvolupats o comercialitzats en els darrers anys:

- 1) Eye-in-the-sea: Infraestructura estàtica per la filmació en entorns submarins. Es un observatori submarí que utilitza LEDs que emeten llum amb longituds d'ona de 680nm, no visible pels animals, en combinació amb una càmera "low-light-level" (LLL) [33]
- 2) [19]: Sistema visual per la detecció de bancs de peixos i com a observatori submarí. Utilitza una càmera Gigabit Ethernet connectada per fibra òptica a un ordinador de control. Genera imatges amb resolucions de 1360×1024 , i les fonts de llum utilitzades emeten llum estroboscòpica per reduir al màxim el moviment en les fotos.
- 3) [13]: Sistema visual submarí per monitoritzar la fauna marina en esculls de coral. El sistema utilitza una lent de gran angular amb una càmera d'infrarojos connectada per fibra òptica a un ordinador central.
- 4) El projecte d'observatori submarí NEPTUNE a l'oceà Pacífic necessita integrar estacions i sistemes de visió i filmació per donar suport a les tasques de vigilància i observació que han de desenvolupar els ROVs. Les plataformes de visió es componen de càmeres Panasonic AK-HC1500G d'alta definició i tres tipus diferents de sistemes de il·luminació: i) un sistema laser de tres feixos pel càlcul de informació de distàncies, ii) dos LEDs regulables que donen 406 lumens per un equivalent de 250 Watts, i iii) un emissor HID de 150 Watts per augmentar la distància de filmació [20].
- 5) Sedlazeck *et al* [22] varen presentar un sistema per reconstruccions 3D del fons marí basat en la identificació i seguiments d'elements característics de la imatge en successives fotos. Les imatges eres preses des de el ROV Kiel 6000 equipat amb 3 càmeres: i) una d'alta definició, ii) una càmera standard de color PAL i, iii) una càmera en modus esclau controlada remotament i amb flash automàtic. El ROV està equipat amb una llum halògena de 250 Watts, una HID de 70 Watts i un focus HMI regulable de 400 Watts.
- 6) En [16] Negahdaripour i Firoozfam varen proposar un sistema de visió estèreo per la inspecció automàtica de cascos de vaixells enfonsats, ideat per UAVs, però provat primerament en un ROV.
- 7) Negahdaripour *et al* [17] varen explorar les possibilitats del DIDSON, un sistema òptic-acústic que proveeix imatges acústiques en 3D. Les imatges acústiques es generen a partir de ones sonores i són tant exactes que es poden processar quasi de la mateixa manera que les imatges estàndard.
- 8) En el CSIRO Marine and Atmospheric Research a Australia [23] es va desenvolupar un ROV per la inspecció i estudis d'habitats submarins, per a la construcció de mapes i per a la detecció de bancs de peixos. El vehicle està equipat amb: i) dues càmeres PAL configurades en

estèreo per gravar vídeo, geo-localitzar-les amb un GPS, ii) una càmera d'alta resolució per la presa d'imatges estàtiques en diferent punts per realitzar el *mossaicking* del fons marí, iii) una càmera enfocada cap al front per fer detecció i evitació d'obstacles. Aquest ROV incorpora dues llums incandescents de 250 Watts per la filmació de vídeo i dues llums estroboscòpiques per la presa d'imatges estàtiques destinades a fer el mapejat del fons marí.

- 9) Gavia es un vehicle submarí comercial produït per l'empresa Hafmynd. Gavia és un sistema versàtil, modular i eficaç per tasques de monitorització o vigilància submarina. Pot incorporar sonar o càmeres per detecció d'obstacles o seguiment de cables.
- 10) Recentment, s'ha desenvolupat una estació estàtica submarina de support i proveïment al UAV REMUS [1]. REMUS incorpora varies càmeres per diferent propòsits: i) una càmera Ethernet per support en la entrada i sortida del submarí en la estació i ii) una càmera-periscopi per l'observació de la superfície del mar.
- 11) Hercules [7] es un ROV especialment dissenyat per treballar a grans profunditats, manipulant, recuperant o escarbant en vaixells enfonsats. Hercules està equipat amb una càmera d'alta definició i dues càmeres *still* per la presa d'imatges estàtiques per mapejar el fons marí i calcular les extensions de les àrees a monitoritzar.
- 12) ARGUS es un ROV produït per Woods Hole Marine Systems, Inc, (Woods Hole Oceanographic Institution), una empresa especialitzada en el desenvolupament i muntatge de ROVs o UAVs. ARGUS pot operar independentment o actuar sincronitzadament amb altres submarins. Està equipat amb càmeres i llums HMI pel registre d'imatges submarines [25].
- 13) Phantom DHD2+2 y Phantom HD2+2, de la empresa Deep Ocean Engineering [6], són dos ROVS dissenyats especialment per la recerca de bancs de peixos, missions militars, recerca científica, inspecció de canonades de gas o petroli o per la filmació d'entorns submarins. Son uns vehicles especialment adient per treballar a grans profunditats i amb corrents d'aigua fortes. Ambdós vehicles incorporen una càmera color PAL/NTSC amb una lent de gran angular, i dues llums halògenes Tungsten de 250 watts per il·luminar l'àrea d'inspecció.

IV. POLARITZACIÓ

Tal i com s'ha explicat anteriorment, un dels problemes més greus a l'hora de obtenir imatges del fons marí és el *backscatter*. Aquest fenomen provoca pèrdues de contrast en les imatges, reduint la seva qualitat i generant problemes en el seu posterior tractament i anàlisi. Alguns estudis [30] suggereixen que la visió humana associa la qualitat de les imatges molt més amb el contrast que amb altres paràmetres, com per exemple, la resolució.

Donat que el *backscatter* depèn de la quantitat d'aigua en front de la càmera, la pèrdua de contrast depèn de la distància entre la càmera i els objectes observats. La llum artificial augmenta la quantitat de *backscatter* [30].

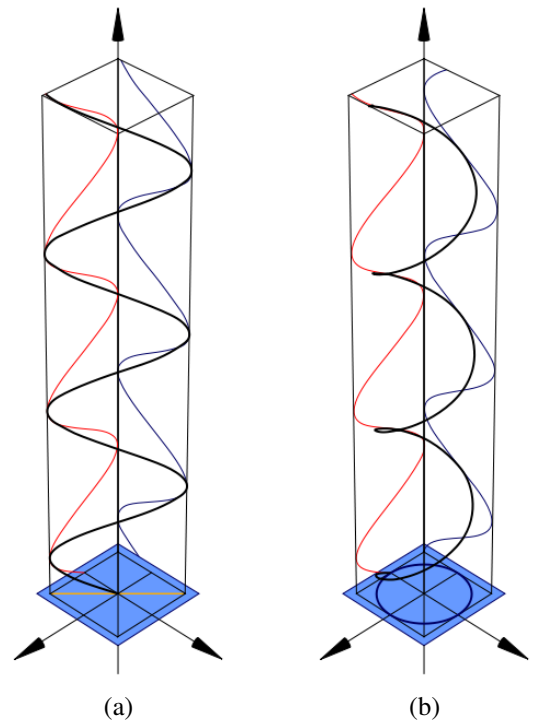


Figura 3. (a) Polarització Lineal (b) Polarització Circular. Font: Wikipedia

Afortunadament, l'aigua i les partícules en suspensió es comporten de forma diferent si utilitzem llum polaritzada. Treibitz i Schechner [29] assumeixen que els objectes reflecteixen la llum despolaritzant-la, mentre que el *backscatter* preserva la polarització original. Contràriament, segons [30], els objectes reflecteixen la llum polaritzada mantenint la seva polarització en canvi el *backscatter* despolaritza la llum original. De totes formes, el que és realment rellevant és el fet de que els objectes es comporten de manera diferent a les partícules que generen *backscatter* quan s'il·lumina l'escena amb llum polaritzada.

A. Conceptes Bàsics

La llum es considera una ona oscil·lant en una direcció arbitrària perpendicular a la seva direcció de moviment. La polarització ens indica la direcció d'aquestes oscil·lacions. La polarització és lineal si oscil·la en una sola direcció (Figura 3-a) o circular si va rotant a mesura que l'ona es mou (Figura 3-b). El grau de polarització mesura la correlació entre els plans d'oscil·lació i defineix un conjunt continu de valors entre els extrems de llum polaritzada i llum sense polaritzar. La llum natural és força despolaritzada, el que significa una molt baixa correlació entre els plans d'oscil·lació. Hi ha algunes excepcions [21]: la llum del sol està parcialment polaritzada dins l'aigua gracies a la refracció en la superfície marina.

Teòricament, un polaritzador es un instrument que converteix la llum no polaritzada o parcialment polaritzada en llum polaritzada. A nivell pràctic, un filtre polaritzador filtra la llum que no compleix certs requeriments en els seus plans d'oscil·lació. Una de les conseqüències del filtre és la pèrdua, en la majoria del casos, de fins un 50% de la intensitat de la llum.

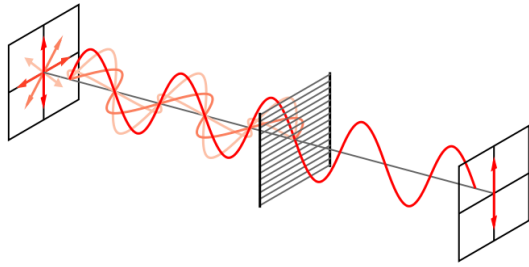


Figura 4. Polaritzador Lineal. Font: Wikipedia

Un filtre polaritzador lineal només deixa passar llum amb una certa polarització lineal. La figura 4 mostra com es comporta un filtre lineal. Un filtre polaritzador circular converteix llum no polaritzada en llum polaritzada circularment (figura 3). Sembla que les càmeres amb auto-focus, auto-exposició a la llum o mesuradors de llum TTL no funcionen correctament amb llum polaritzada linealment.

El diferent comportament dels objectes i del *backscatter* front a diferents polaritzacions de la llum pot ser utilitzat per millorar el contrast de les imatges preses sota l'aigua [12], [21], [30]. Algunes de les tècniques estudiades per reduir el *backscatter* i millorar el contrast són conegudes amb els seus termes anglesos: *passive polarization analysis* i *active polarization analysis*. La figura 5-a mostra un esquema de *passive polarization analysis*. Si el *backscatter* produït per la llum natural està parcialment polaritzat, la intensitat captada en la càmera depèn de la orientació del filtre. Aquesta intensitat del *backscatter* va des de un valor màxim obtingut quan la orientació del filtre és paral·lela al angle de polarització del *backscatter* fins a un mínim que es presenta quan ambdues orientacions són perpendiculars. En el cas de l'*active polarization analysis* (figura 5-b), tenim una font de llum artificial a més de la càmera, i ambdós components duen incorporat un filtre polaritzador. Si el filtre polaritzador de la càmera és paral·lel al de la font de llum, les imatges contenen el màxim d'intensitat de *backscatter*. Si el filtre de la càmera i el de la font de llum es desfasen 90° , les imatges obtingudes presenten un mínim en la intensitat del *backscatter*.

V. CONCLUSIONS

És innegable que la utilització de filtres de polarització comporta algunes avantatges, però la utilització de filtres polaritzants també genera alguns problemes i la forma de enfocar aquests problemes és el que acaba per decidir si val la pena o no utilitzar llum polaritzada. La tècnica de la polarització és barata, de fàcil implementació i no suposa grans requisits de CPU. La qüestió no és demostrar si les tècniques basades en llum polaritzada són millors que d'altres tècniques molt més costoses, sinó en veure si proporciona prou beneficis respecte a una configuració bàsica. L'estudi de Treibitz and Schechner [31] relata que el principal problema dels filtres polaritzadors és que atenuen part de la llum que els travessa. Per això les càmeres han d'augmentar el seu temps d'exposició a la llum. Mantenint el temps d'exposició constant, una pràctica comú en la presa de video, no es millora la relació

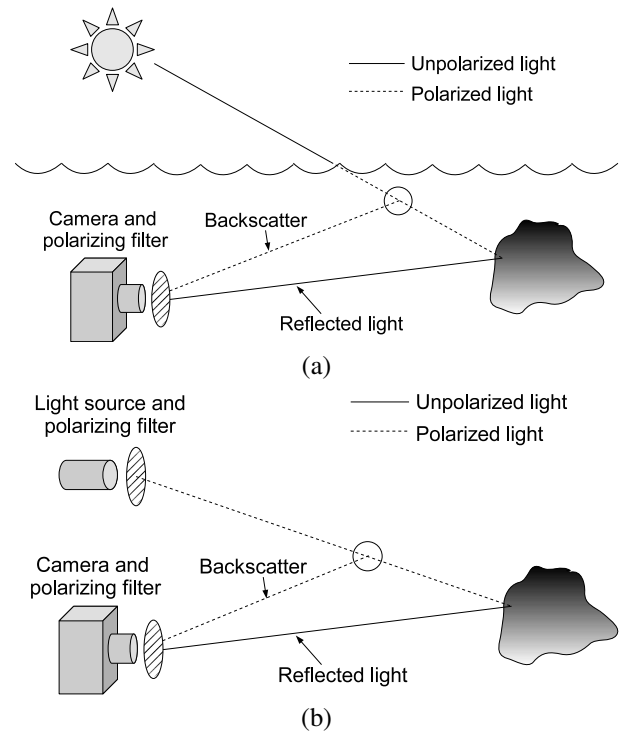


Figura 5. (a) Passive polarization analysis (b) Active polarization analysis

senyal/soroll (SNR) de les imatges. En molts casos, utilitzar polarització no comporta beneficis significatius a l'hora de distingir els objectes del soroll en les imatges preses. Utilitzar polarització seria preferible a l'ús d'algoritmes de millores del contrast, especialment si hi ha diferents objectes situats a diferents distàncies en l'escena. Si la càmera va muntada en un ROV o un AUV que navega paral·lelament al fons marí, i si està enfocada perpendicularment cap al fons, la polarització rarament dona millors resultats que els algoritmes de tractament de les imatges.

A l'hora de decidir quina càmera o càmeres i quin sistema d'il·luminació cal utilitzar en un sistema de visió submarí, es necessari considerar les necessitats del projecte a desenvolupar, quina serà la utilitat del sistema i a quins entorns s'utilitzarà. El sistema de visió serà d'una o d'una altra manera si ha d'anar adreçat a un ROV, a un UAV o a una estació estàtica. Les estacions estàtiques o els ROVs poden anar equipats amb infraestructures de major consum energètic ja que aquesta es proveeix a partir dels cables umbilicals. La majoria de ROVs o estacions estàtiques utilitzen halògens o HIDs. Aquests sistemes emeten llum d'alta intensitat, però no són els més eficients. Els AUVs depenen de la càrrega de les seves bateries, per lo tant és importantíssim incorporar sistemes de il·luminació que combinin màxima eficàcia amb mínim consum, per exemple, LEDS. La llum infraroja presenta molta atenuació dins l'aigua, i encara que hi ha alguns sistemes submarins que l'utilitzen per que no és visible pels animals, no hi ha una opinió comú respecte si és o no convenient utilitzar-la.

La llum laser és la que ofereix millor resultats per captar imatges a llargues distàncies, però el sistema és car i necessita un escanejat de l'entorn i un post-processament important de

les imatges, cosa que fa més lent el sistema. Els submarins dedicats a explorar instal·lacions submarines, cables o canonades submarines, o a fer mapejat del fons marí, necessiten anar equipats amb diverses càmeres: una enfocada cap el fons i una altra enfocada cap a davant per detectar i evitar els obstacles. Les càmeres d'alta resolució amb lents de gran angular són preferibles a les càmeres normals per que a) l'alta resolució ofereix millor qualitat d'imatge, i b) la lent de gran angular ofereix un camp de visió superior, preferible per la detecció dels obstacles i per la visualització de l'àrea marina a inspeccionar o mapejar.

Les comunicacions amb fibra òptica o gigabit ethernet són la millor opció per la transmissió d'imatges d'alta resolució. Les comunicacions entre la càmera, l'ordinador del vehicle i la central de control han de ser el més ràpides possible, especialment si els algorismes de post-processament de les imatges poden ser complexos i a vegades lents.

REFERÈNCIES

- [1] B. Allen, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, A. Kukulya, G. Packard, M. Purcell, and R. Stokely. Autonomous docking demonstrations with enhanced remus technology. In *IEEE OCEANS*, pages 1–6, 2006.
- [2] F.M. Caimi, F.R. Dalgleish, T.E. Giddings, J.J. Shirron, C. Mazel, and K. Chiang. Pulse versus cw laser line scan imaging detection methods: Simulation results. In *IEEE OCEANS*, pages 1–6, 2007.
- [3] B. Cochenour, L. Mullen, and A. Laux. Phase coherent digital communications for wireless optical links in turbid underwater environments. In *IEEE OCEANS*, pages 1–5, 2007.
- [4] F.R. Dalgleish, F.M. Caimi W.B. Britton, and C.F. Andren. Improved lls imaging performance in scattering-dominant waters. In *International Society for Optical Engineering (SPIE)*, volume 7317, 2009.
- [5] F.R. Dalgleish, F.M. Caimi, W.B. Britton, C.F. Andren, and Y. Wan. Experimental comparison of pulsed-gated and continuous wave lls underwater imagers. In *IEEE Ocean Optics IX*, 2008.
- [6] Deep Ocean Engineering. Dhd2+2 rov. <http://www.deepocean.com/data.html>.
- [7] Institute for Exploration (IFE). Hercules ROV. <http://www.mysticaquarium.org/ife/technology/340-hercules>.
- [8] H.R. Gordon. *Ocean Optics, Oxford monographs on geology and geophysics*, chapter Modeling and simulating radiative transfer in the ocean, pages 3–39. Oxford University Press, 1994.
- [9] H. Han, X. Zhang, and W. Ge. Performance evaluation of underwater range gated viewing based on image quality metric. In *Int'l Conference on Electronic Measurements and Instruments (ICEMI)*, volume 4, pages 441–444, 2009.
- [10] J.S. Jaffe. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15(2):101–111, 1990.
- [11] J.S. Jaffe. Multi autonomous underwater vehicle optical imaging for extended performance. In *Proceedings of the Oceans conference*, 2007.
- [12] N. Karpel and Y.Y. Schechner. Portable polarimetric underwater imaging system with a linear response. In *Proceedings of the SPIE*, pages 206–115, 2004.
- [13] K. Lam, R.S. Bradbeer, P.K.S. Shin, K.K.K. Kun, and P. Hodqson. Application of a real-time underwater surveillance camera in monitoring of fish assemblages on a shallow coral communities in a marine park. In *IEEE OCEANS*, pages 1–7, 2007.
- [14] A. Laux, L. Mullen, and B. Cochenour. I/q data processing techniques for the analysis of an amplitude modulated laser imaging system. In *Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO)*, pages 1–2, 2007.
- [15] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar. Structured light methods for underwater imaging: Light stripe scanning and photometric stereo. In *IEEE OCEANS*, volume 3, pages 2610–2617, 2005.
- [16] S. Negahdaripour and P. Firoozfam. A rov stereovision system for ship-hull inspection. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(3):551–564, 2006.
- [17] S. Negahdaripour, H. Sekkati, and H. Pirsiavash. Opti-acoustic stereo imaging : on system calibration and 3-d target reconstruction. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1–8, 2007.
- [18] S. Negahdaripour, H. Zhang, and X. Han. Investigation of photometric stereo method for 3-d shape recovery from underwater imaging. In *IEEE OCEANS*, volume 2, pages 1010–1017, 2002.
- [19] G.E. Rosenkranz, S.M. Gallager, R.W. Shepard, and M. Blakeslee. Development of a high-speed, megapixel benthic imaging system for coastal fisheries research in alaska. *Fisheries Research*, 92(1):340–344, 2008.
- [20] J. Roston, C. Bradley, and J.R. Cooperstock. Underwater window: High definition video on venus and neptune. In *IEEE OCEANS*, pages 1–8, 2007.
- [21] Y.Y. Schechner and N. Karpel. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3):570–587, 2005.
- [22] A. Sedlazeck, K. Köser, and R. Koch. 3d reconstruction based on underwater video from rov kiel 6000 considering underwater imaging conditions. In *IEEE OCEANS*, pages 1–10, 2009.
- [23] M.R. Shortis, J.W. Seager, A. Williams, B.A. Barker, and M. Sherlock. A towed body stereo-video system for deep water benthic habitat surveys. In *Eighth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, volume 2, pages 150–157, 2007.
- [24] B.A. Swartz. Laser range gate underwater imaging advances. In *IEEE OCEANS*, volume 2, pages 722–727, 1994.
- [25] Woods HOLE Marine Systems. Argus rov. <http://www.whmsi.com/>.
- [26] C.S. Tan, A. Sluzek, G.L. Seet, and T.Y. Jiang. Range gated imaging system for underwater robotic vehicle. In *IEEE OCEANS*, pages 1–6, 2006.
- [27] G. Taylor and L. Kleeman. *Visual Perception and Robotic Manipulation*, volume 26, chapter Shape Recovery Using Robust Light Stripe Scanning, pages 31–56. 2006.
- [28] ThinkQuest. The physics of diving: Light and vision. <http://library.thinkquest.org/28170/35.html>, Resource accessed Feb-2010.
- [29] T. Treibitz and Y.Y. Schechner. Instant 3descatter. In *Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 1861–1868, 2006.
- [30] T. Treibitz and Y.Y. Schechner. Active polarization descattering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(3):385–399, 2009.
- [31] T. Treibitz and Schechner Y.Y. Polarization: Beneficial for visibility enhancement? In *Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009.
- [32] A. Weidemann, G.R. Fournier, L. Forand, and P. Mathieu. In harbor underwater threat detection/identification using active imaging. In *International Society for Optical Engineering (SPIE)*, volume 5780, 2005.
- [33] E. Widder. Sly eye for the shy guy. *Oceanography*, 20(4):46–51, 2007.