

METROLOGIA 3D DE SUPERFÍCIES EXTENSES

Santiago Royo,¹ Miguel Ares,¹ Jordi Riu,¹ David Panyella²

1. Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes. Universitat Politècnica de Catalunya

2. Antonio Puig, S. A.

1. Metrologia tridimensional

Les diferents tècniques d'adquisició d'imatges tridimensionals d'objectes reals mai han estat tan a prop de la nostra vida diària. Els telèfons mòbils de la propera generació s'anuncien amb capacitats de reconstrucció 3D. El món de l'audiovisual estrena cada nova gran producció en 3D; hi ha aplicacions de mòbil per convertir en 3D les nostres fotografies, i els hologrames i altres tecnologies vàries estan introduint-se ràpidament en el món de l'electrònica de consum i el nostre llenguatge per oferir més proximitat en la reproducció del nostre món 3D.

Més enllà d'aquestes aplicacions audiovisuals en què l'interès està a reconstruir una escena amb aparença tridimensional a partir d'imatges bidimensionals, jugant amb el nostre sistema visual amb diferents tècniques d'afegir profunditat a les imatges, s'han establert diverses tècniques de mesura que permeten reconstruir tridimensionalment escenes i objectes extensos. L'objectiu pot ser digitalitzar-los per a la seva edició virtual posterior aprofitant la informació de volum afegida, o reproduir-los en impressores 3D, però sovint es fan servir amb finalitats de detecció i caracterització precisa de volums, formes i propietats superficials com la rugositat. Aquestes informacions tenen molt d'interès en diferents àmbits industrials i biomèdics. Una de les principals barreres que s'estableixen davant una determinada necessitat, però, és la dificultat de seleccionar la tècnica de mesura 3D òptima per a l'aplicació d'entre les diferents possibilitats existents. Igualment, l'adaptació a les necessitats dels usuaris de tecnologies existents, fins i tot si estan molt ben desenvolupades i fins i tot disponibles comercialment, pot no ser evident encara, si el format no és generalista o l'aplicació té una especificitat especial.

El problema neix de l'existència de diferents tècniques de mesura 3D sense contacte, ja que cada tècnica de mesura per mitjans òptics és adequada per a una determinada aplicació, objecte, camp de visió o distància de treball. Existeix una enorme varietat de tècniques de metrologia òptica capaces d'entregar sense contacte una imatge tridimensional detallada de superfícies de diferents tipus. Així, és possible trobar

tècniques amb resolucions inferiors al nanòmetre (la interferometria o la microscòpia interferomètrica amb detecció de fase en serien exemples). Amb resolucions menors a la interferometria, altres tècniques es basen en la reconstrucció de superfícies 3D a partir de la mesura de conjunts ordenats de punts de llum, dels quals es verifica la posició de millor enfocament (perfilometria confocal o interferometria de llum blanca). Ara bé, en el moment en què ens acostem a formes amb escales del micròmetre al centímetre, i si a més l'aplicació demana realitzar anàlisis d'àrees grans a velocitats importants i/o en entorns poc col·laboratius o fins i tot hostils, el rang de tècniques es veu reduït notablement. La intenció d'aquest article és presentar una breu revisió de les dues famílies de tècniques més rellevants en el camp de la imatge 3D industrial, útils en àrees extenses, capacitades per fer captures ràpides, i amb resolucions variables però en el rang del centímetre a la micra. La secció 2 presentarà el principi de funcionament de dues de les principals famílies de tècniques en aquest àmbit: l'estereoscòpia basada en projecció de franges i les tècniques de temps de vol. En la secció 3 es presentaran exemples d'aplicacions i desenvolupaments que hem realitzat en el Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6) de la UPC en l'àmbit d'aquestes tècniques. Finalment, la secció 4 presentarà unes breus conclusions respecte de les tècniques de metrologia 3D d'àrea extensa presentades.

2. Introducció a les tècniques de metrologia 3D d'àrees extenses

2.1. Estereoscòpia

El principi de l'estereoscòpia es conceptualment molt simple, ja que és el que fa servir el sistema visual de la majoria dels éssers vius. Amb una única imatge és impossible reconstruir la sensació de profunditat, com podem comprovar només de tapar-nos un ull en un entorn que no coneguem. En canvi, les diferències en la percepció de dues imatges del mateix objecte observades des de punts de vista «monoculars» lleugera-

ment diferents, per dos detectors situats a una distància coneguda, permeten recuperar la informació de profunditat de l'objecte amb precisió. Aquests detectors poden ser els nostres ulls o bé, en aplicacions d'enginyeria, càmeres situades a distàncies conegudes amb un nombre de píxels variable.

Portada a l'expressió més simple de l'experiment, una reconstrucció estereoscòpica requereix, doncs, una parella de càmeres que, des de diferents posicions i en angles de visió diferents (però coneguts), observen l'objecte a reconstruir i permeten mesurar la seva posició a partir, essencialment, de correlacions entre les dues imatges que poden interpretar-se com una triangulació entre els punts corresponents de les imatges captades (per ser precisos, el que s'acostuma a aplicar és una reconstrucció de l'alçada basada en una configuració de triangulació coneguda com a *geometria epipolar*), sovint partint d'algun procés de calibratge previ. Depenent de l'aplicació, però, pot aparèixer el problema de la detecció preliminar de quins són els punts corresponents de les dues imatges que s'aparellen. Sovint, per exemple, se cerquen punts destacats en la imatge que es detecten mitjançant algorismes de detecció de vores o d'angles, per exemple, i per tant la densitat de punts de mostreig queda limitada a les parelles de punts corresponents que es puguin identificar en totes dues imatges amb fiabilitat.

En aplicacions en què es persegueix determinar reconstruccions detallades de les superfícies a mesurar, sovint es completa el sistema d'estereoscòpia amb la projecció d'algun tipus de patró de llum estructurada, molt habitualment un patró sinusoidal de línies blanques i negres, com es mostra a la figura 1. El paper de les línies és fer de «marques» a distància coneguda que permeten obtenir una multitud de punts corresponents entre les dues imatges, i per tant una reconstrucció 3D molt detallada, que permet extreure informació de forma, volum o rugositat de la superfície mesurada a partir de les alteracions en la forma de les línies que introdueix l'objecte a reconstruir. Amb aquesta tecnologia és possible obtenir topografies de superfícies amb milions de punts de mostreig.

Existeix un nombre considerable de variants d'aquesta tècnica, des de l'escaneig de la superfície amb línies de llum, molt adequat per a la reconstrucció 3D d'objectes en cadenes de producció (i també sovint basat en l'estereos-

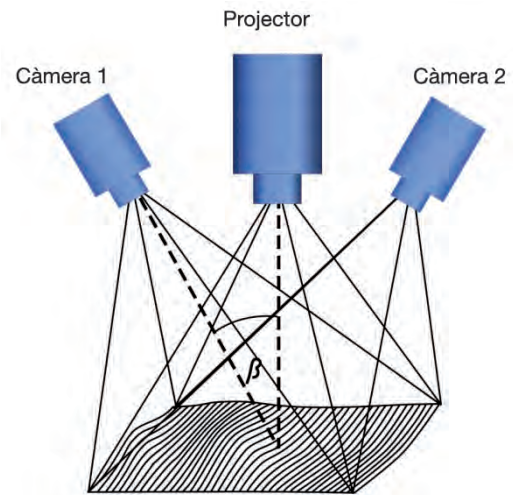


FIGURA 1. Sistema de dues càmeres que capten patrons de franges deformats per l'objecte. La posició de la franja observada per cada càmera depèn del triangle (angle β) que formen projector i càmera.

còpia), o muntatges amb una única càmera i un projector en què la reconstrucció 3D s'obté d'un control acurat de les geometries d'il·luminació i observació existents entre la càmera, l'objecte i el projector (figura 2).

En tots els casos, però, es tracta d'una família de tècniques senzilles i robustes, amb muntatges considerablement econòmics, que més enllà de situacions específiques assoleixen valors típics de resolució vertical entre 1 i 500 μm , depenent del disseny de la configuració experimental, i en què la resolució horitzontal (entesa com la distància entre punts de mesura sobre l'objecte) queda entre 1 i 100 μm amb muntatges experimentals formats per components disponibles a costos baixos. Un cop obtinguda la topografia 3D, existeixen diferents tècniques senzilles i ràpides per calcular volums, rugositats i distàncies entre elements de la mostra en moltes de les llibreries d'informació de font pública (*open source*) disponibles a la xarxa.

2.2. Tècniques de temps de vol

El temps de vol (Forrester i Hulme, 1981) és una tècnica de mesura que permet obtenir mesures de distàncies a partir

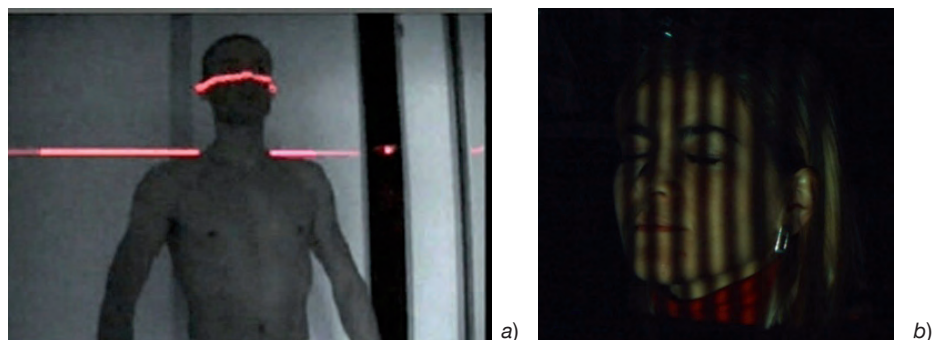


FIGURA 2. Tècniques de mesura 3D del cos humà mitjançant l'escaneig seqüencial per línia làser (Vitronic GmbH) (a), i projecció de franges en tot el camp (b).

d'una dada coneguda com és la velocitat de la llum. Depenent del camp d'aplicació s'anomena *lidar* (*light detection and ranging*), especialment quan es fa servir en ciències de l'atmosfera, o *LADAR* (*laser detection and ranging*), si parlem d'aplicacions en l'àmbit dels vehicles i la seguretat, o més genèricament *sistemes de temps de vol* (TOF, *time of flight*). Les fronteres d'aquesta terminologia són, però, poc clares i segurament es podrien proposar moltes altres definicions. El fet és que tots els sistemes TOF, LIDAR o LADAR utilitzen una font de llum per il·luminar un objecte o escena i capten part de la llum reflectida per obtenir-ne directament una mesura de distància. La tècnica del temps de vol té dues variants diferents, una basada en llum polsada (Maatta *et al.*, 1993) i una altra basada en modulació de llum contínua (Xu *et al.*, 1998).

La tècnica polsada fa servir polsos làser de duració molt curta per il·luminar l'objecte. La duració típica pot estar entre 1 i 10 ns. Un comptador de temps d'alta precisió (TDC, *time-to-digital converter*) compta el temps transcorregut entre l'enviament i la recepció del pols reflectit en l'objecte. La mesura de distància s'obté directament a través de la fórmula del moviment rectilini uniforme fent servir la velocitat de la llum.

La tècnica modulada fa servir una font de llum contínua modulada sinusoidalment. Aquesta il·lumina l'objecte i un detector mesura la fase de la llum reflectida en l'objecte. Normalment aquests equips fan servir llum difusa com ara la generada per LED d'alta potència. L'expressió següent permet deduir el valor de distància mesurat:

$$d = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\theta}{2\pi},$$

on f és la freqüència de modulació, c és la velocitat de la llum i θ és la fase mesurada. La distància màxima mesurable està limitada, en aquest cas, per la freqüència de modulació. És comú utilitzar freqüències entre 10 i 20 MHz, les quals ofereixen distàncies de mesures entre 7,5 i 15 m (Lange *et al.*, 1999). La figura 3 presenta esquemàticament una configuració de mesura típica de cadascuna de les dues tècniques. És important notar que en un sistema de temps de vol la mesura de distància s'obté directament del compte de temps, i no són necessaris calibratges ni llargs càlculs posteriors, com succeeix en estereoscòpia.

Tot això, però, es refereix a un sistema de mesura puntual. Per tal d'obtenir una imatge tridimensional completa, és a dir, un nombre elevat de punts mesurats disposats en

forma matricial, cal incorporar algun mètode d'escaneig a part del mateix sistema de mesura del temps de vol. La figura 4 mostra exemples d'imatges tridimensionals obtingudes amb aquesta tècnica. Pot veure's com la imatge està formada per un núvol de punts en un espai tridimensional. La codificació de color dóna, visualment, informació sobre la distància de cadascuna de les parts de la imatge al dispositiu d'emissió i recepció. Es tracta, doncs, de repetir el procés de mesura del temps de vol en molts punts de l'escena.

Existeixen dues famílies de mètodes per mesurar imatges de temps de vol. Per una banda, hi ha els sistemes basats en una estratègia d'escaneig (Milroy *et al.*, 1996) i, per una altra, els basats en matrius de detectors (Ailisto *et al.*, 2002). Els sistemes d'escaneig seqüencial formen la imatge mesurant punts únics de manera seqüencial a gran velocitat, i s'apliquen generalment a sistemes TOF polsats. La seqüència d'il·luminació és implementada mecànicament mitjançant sistemes òptics o optomecànics com miralls galvanomètrics, miralls amb microsistema (MEMS), defectors acusticoòptics, etc. Un dels principals avantatges d'aquesta estratègia és que permet concentrar molt la potència del feix làser, de manera que maximitza la distància a la qual és possible obtenir dades per sobre del soroll del circuit de detecció. Un dels factors que limiten les prestacions de mesura dels sistemes de temps de vol és la seva capacitat de detectar feixos reflectits de baixa potència, sigui per la distància a l'escena o per la baixa reflectància d'aquesta. La baixa divergència de la llum làser en una imatge obtinguda per escaneig permet mantenir concentracions d'energia per unitat de superfície molt elevades a distàncies llargues, amb què s'aconsegueixen mesures de desenes de kilòmetres amb resolucions espacials molt elevades. El principal desavantatge d'aquesta tecnologia, però, és el temps de mesura d'una imatge completa. Rarament és possible mesurar més d'una imatge per segon, cosa que limita l'ús d'aquests sistemes en aplicacions en què apareixen objectes en moviment.

L'altra estratègia que permet obtenir imatges per temps de vol són els sistemes basats en matrius de detectors. Aquests utilitzen un conjunt de detectors disposats en quadrícula, en què cadascun té capacitat de mesura TOF, ja sigui mitjançant la tècnica polsada o la modulada. En aquest cas, els punts de la imatge tridimensional són mesurats simultàniament fent servir cadascun dels detectors del conjunt. El conjunt de punts mesurats formen la imatge. El principal avantatge d'aquesta estratègia consis-

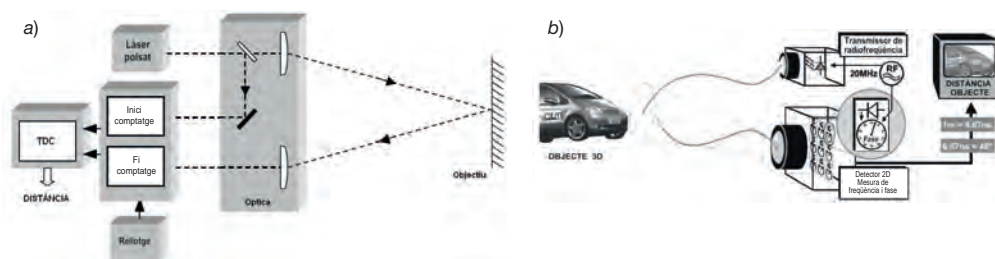


FIGURA 3. Tècniques de temps de vol: a) temps de vol polsats i b) temps de vol modulats (Lange i Seitz, 2000) (OULU).



FIGURA 4. Exemples d'imatges 3D de temps de vol: a) escena exterior i b) escena interior (Schwarz *et al.*, 2012).

teix en la possibilitat de mesurar una gran quantitat de punts de l'escena simultàniament, i aconseguir així un nombre d'imatges per segon molt elevat. Per aconseguir-ho cal que la font de llum il·lumini simultàniament cadascun dels punts que es mesuren, cosa que implica dividir la potència de l'il·luminació entre tots els punts a mesurar. L'efecte que provoca és que el feix s'expandeix sobre una superfície molt més gran en comparació amb els sistemes d'escaneig. En conseqüència, en disminuir l'energia rebuda en cada punt de l'escena, l'energia reflectida serà també molt menor, i de la mateixa manera el rang de distàncies mesurable es reduirà, ja que arriba molta menys energia als detectors. Normalment, aquests sistemes estan limitats a uns 15 m en ambients d'interior (sense llum solar). Existeixen equips comercials que poden arribar a funcionar a distàncies de fins a 100 m, tot i que el seu cost és extremament alt ja que utilitzen làsers de molt alta potència. El principal avantatge dels sistemes basats en una matriu de detectors és que aconseguen velocitats de refrescament d'imatge molt elevades, cosa que els fa molt útils en aplicacions en què apareixen objectes en moviment. No obstant això, el seu ús en situacions exteriors o per a distàncies superiors a 15 m és limitat, en la majoria d'aplicacions.

3. Alguns exemples d'aplicació

3.1. Estereoscòpia: mesures *in vivo* del cos humà

Una de les aplicacions de més èxit de l'estereoscòpia combinada amb projecció de franges és la mesura 3D del cos humà, que té un paper molt important en múltiples aplicacions industrials relacionades amb els sectors del cinema i els jocs d'ordinador, la cirurgia plàstica, la dermatologia, la medicina forense, la moda, l'oftalmologia, l'ortopèdia o l'odontologia, entre d'altres. En les últimes dues dècades hi ha hagut un important creixement de vendes en sistemes complets de digitalització 3D del cos humà, amb el desenvolupament de nous mètodes i eines per digitalitzar i utilitzar eficientment els núvols de punts obtinguts segons l'aplicació. En contraposició als aparells de mesura per contacte mecànic, els aparells òptics s'han imposat, ja que ofereixen importants avantatges, principalment el fet

de proporcionar un escaneig *in vivo* sense contacte amb la persona, una rapidesa més gran en la mesura i una gran precisió a l'hora de mesurar detalls petits.

S'han fet servir diferents sistemes per mesurar la forma del cos humà, íntegrament o de determinades parts d'interès, que, com hem vist, poden classificar-se en els basats en projecció de patrons de llum estructurada (figura 1), els d'escaneig mitjançant punt o línia làser (figura 2a) i d'altres de tipus estereoscòpic basats en múltiples imatges capturades des de diferents punts de vista.

Tots els sistemes tenen avantatges i punts febles depenent dels requeriments de l'aplicació concreta. Les tècniques estereoscòpiques són tècniques passives que no requereixen cap font d'il·luminació, però que tenen com a principals desavantatges l'intens esforç de computació necessari i la pitjor exactitud de mesura. Les altres dues tecnologies són de tipus actiu (fan servir una font d'il·luminació específica) i comparteixen el mateix principi de mesura 3D basat en triangulació a partir de la deformació de la llum projectada en la superfície mesurada. La diferència més significativa entre totes dues tècniques es troba en la forma en què la llum es projecta sobre el cos humà, que és un únic punt o línia làser que s'haurà de moure mecànicament al llarg del cos en el mètode d'escaneig làser, mentre que en el cas del mètode de llum estructurada es projecta un patró de punts o franges estès en tot el camp del cos, com es pot observar a la figura 2b. A causa, doncs, del procés d'escaneig seqüencial que requereix la tècnica de mesura amb làser, aquesta resulta menys adient a l'hora de mesurar tota una figura humana o parts d'aquesta que són de mida gran, ja que el temps de mesura és de diversos segons i els moviments inherents a la persona deguts a la respiració o a contraccions musculars involuntàries generen més errors. En general, el mètode d'escaneig làser resulta apropiat per a la mesura de petites parts del cos, com peus o mans, que es poden mantenir immòbils durant el temps que dura la mesura. Es tracta, però, d'un sistema idoni per a mesures de volum i forma per control de qualitat en processos en línia de producció. El sistema basat en la projecció de llum estructurada supera aquesta restricció ja que pot mesurar una superfície més gran en una sola adquisició o fase d'il·luminació.

No obstant això, pel que fa a la transferència de les tecnologies a productes comercials, cadascuna té una presèn-

cia diferent en el mercat. Amb dades del 2009, a escala mundial el 49 % dels escàners 3D comercials de cos humà es basaven en projecció de patrons de llum estructurada, el 32 % feien servir l'escaneig làser i el 19 % restant el formaven aparells basats en fotogrametria i altres tipus de tècniques no tan esteses (D'Apuzzo, 2009). En particular, la tecnologia de projecció de llum estructurada és majoritària des d'un punt de vista comercial a Europa en relació amb la resta del món. Amb dades de 2009, a Europa es produeixen gairebé el 64 % d'aquests productes a escala mundial, enfront del 25 % de l'Amèrica del Nord (EUA i Canadà) i l'11 % de la resta del món (principalment Àsia).

Una gran part d'aquests sistemes comercials s'han concebut específicament per al seu ús en aplicacions mèdiques, i molt particularment en el cas de la cirurgia plàstica. En aquest camp, l'ús d'equips basats en la projecció de llum estructurada ha permès poder planificar amb més precisió les intervencions de cirurgia, dur a terme una comparació molt precisa entre abans i després de l'operació o fins i tot poder simular el resultat d'una operació abans de ser realitzada, i fins i tot seleccionar la pròtesi òptima per al pacient. Un exemple típic és la generació d'una pròtesi d'ull personalitzada per a una persona que l'ha perdut. Mitjançant el sensor de projecció de llum estructurada s'escaneja l'altre ull de l'individu ja que és pràcticament idèntic al perdut; posteriorment es modela amb programari per obtenir el seu model virtual CAD (*computer aided design*), i finalment es realitza físicament mitjançant una eina CAM (*computer aided manufacturing*) (Stelzer *et al.*, 2006). Altres sectors industrials en què aquesta tecnologia ha tingut un gran impacte són el cosmètic i el dermatològic, en què els sistemes de projecció de llum estructurada serveixen per estudiar i analitzar amb precisió i rapidesa la topografia 3D de la pell en diverses regions del cos humà (Jaspers *et al.*, 1999; Royo *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2012). A partir de la topografia 3D, aquests sistemes integrals permeten quantificar directament o indirectament diferents paràmetres morfològics i mecànics de la pell com la rugositat, el volum, el grau d'envelliment, l'anisotropia, la tensió, la fermesa o la plasticitat.

En els darrers cinc anys, al CD6 de la UPC hem treballat molt activament en el desenvolupament d'instrumentació per a la mesura 3D del cos humà en aplicacions industrials dels sectors cosmètic i dermatològic. En concret, el grup ha desenvolupat dos prototips de mesura 3D basats en la tècnica de projecció de llum estructurada en combinació amb l'estereoscòpia, en col·laboració amb socis industrials, del 2009 al 2013. El primer prototip es va desenvolupar per avaluar objectivament, *in vivo* i sense contacte, l'eficàcia de productes cosmètics formulats per reduir arrugues i volums facials, com les potes de gall, les bosses d'ulls, etc., sobre els pacients. Amb aquesta finalitat es va dissenyar i construir un prototip adaptat als requeriments de l'empresa client, pel que fa tant a maquinari com a programari. El prototip va integrar dues configuracions diferents de mesura: una d'alta resolució que permetia mesurar canvis superficials d'unes poques micres, i una de mitjana re-

solució sensible a canvis més substancials però capaç de mesurar superfícies de pell humana més grans. Com a exemple d'ús pràctic, la configuració d'alta resolució es va utilitzar per quantificar objectivament l'eficàcia d'un conjunt de cremes reductores de potes de gall, aplicades a un grup de pacients conforme al protocol estàndard d'avaluació de l'empresa client. Col·locant els i les pacients adequadament, es van registrar les topografies 3D de potes de gall d'ull dret i esquerre en tres moments temporals diferents: a l'inici del tractament, al cap d'un mes del tractament i després de dos mesos de tractament. A la figura 5 es mostra un exemple d'aquestes mesures 3D a la zona de potes de gall a l'inici i al cap d'un mes del tractament cosmètic antiarrugues. La interfície va incorporar una eina que comparava en temps real la imatge actual del pacient amb la registrada en un temps passat, i permetia a l'operador ajustar la posició del pacient d'una manera precisa. A partir de les topografies 3D de la zona de potes de gall, es calculen les rugositats mitjana (Ra) i total en una longitud (Rz), que són les magnituds típicament utilitzades per la indústria cosmètica per quantificar l'efectivitat dels productes cosmètics reductors.

El segon prototip de mesura 3D desenvolupat al CD6 comparteix el mateix principi de mesura que el seu predecessor, encara que és de dimensions més grans i amb més complexitat optomecànica, ja que realitza mesures de zones del cos humà de $0,5 \times 0,5$ m i en un angle frontal de 180° , per a aplicacions de cirurgia estètica (figura 6). El prototip compta amb dues unitats de mesura sincronitzades (cadascuna composta per un projector i dues càmeres) que mesuren les dades 3D del costat dret i esquerre del pacient, que finalment són combinades per programari d'una manera precisa per formar una topografia 3D completa. A més de la informació geomètrica tridimensional, el prototip extreu el color vermell-verd-blau (RGB) de cada punt mesurat, i s'obté com a resultat un 3D amb la textura real de color. A la figura 7 es mostra un exemple de topografia 3D d'una cara obtinguda amb l'escàner.

3.2. Temps de vol: desenvolupament de càmeres d'elevada resolució espacial

Al CD6, simultàniament, hem desenvolupat un sistema de càmera de temps de vol que incorpora característiques combinades dels sistemes basats en escaneig i dels sistemes basats en matrius de detectors. Aquesta combinació proporciona unes prestacions úniques que no ofereix cap altre sistema en el mercat. El sistema està protegit a través de dues patents i permet incrementar substancialment el rang de mesura dels sistemes de matriu de detectors mantenint una velocitat de refrescament d'imatge elevada. A més, proporciona la capacitat de mesurar imatges de resolució espacial molt alta, és a dir, imatges amb una concentració de punts molt elevada, que proporciona a la imatge un gran nivell de detall. La resolució espacial és fins i tot reconfigurable per programari dins una mateixa medicació.

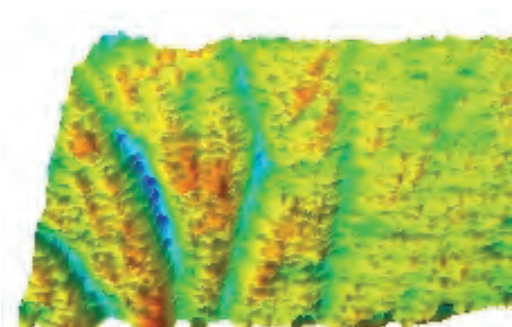
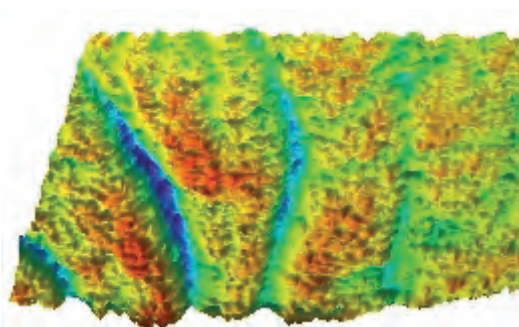
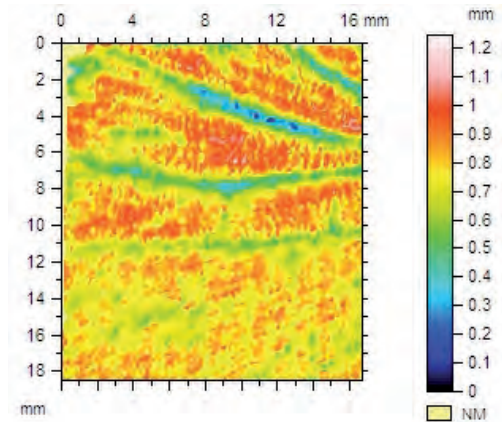
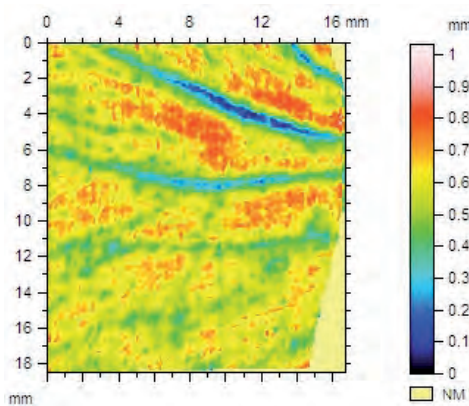
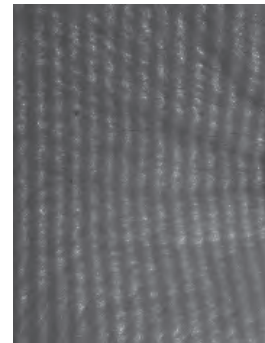


FIGURA 5. Imatges de la mesura *in vivo* de potes de gall amb el prototip d'escàner facial 3D desenvolupat al CD6. Reconstrucció de la topografia 3D a l'inici (esquerra) i després d'un mes de tractament amb la crema antiarrugues (dreta).

El sistema desenvolupat no pot mesurar distàncies tan llargues com les dels sistemes basats en l'escaneig, ni velocitats de refrescament tan elevades com els sistemes basats en les matrius de detectors. No obstant això, ofereix una barreja de capacitats que el fa únic i li permet abordar aplicacions que fins ara no estaven correctament resoltes per cap aparell comercial.

Actualment, aquesta tecnologia es troba en les últimes fases del seu desenvolupament i encara no ofereix el màxim de les seves capacitats. No obstant això, s'ha demostrat la seva viabilitat tecnològica a través d'un prototip especialment dissenyat per a aquesta finalitat. La figura 8 mostra diferents vistes de l'aparell.

Un dels avantatges més destacats que ofereix aquesta tecnologia respecte de les existents és la seva capacitat per adaptar la resolució espacial de la imatge en funció de les necessitats de cada moment. La velocitat de refrescament de les imatges és inversament proporcional a la resolució espacial de la imatge mesurada. Com més alta és la resolució de la imatge, menys velocitat de refrescament. L'increment de resolució també perjudica el rang de distància mesurable, ja que arriba menys energia al detector. Per tant, doncs, es fa necessari trobar un compromís entre la qualitat de la imatge mesurada i la parella velocitat-distància. Els sistemes actuals no permeten configurar aquests paràmetres ja que són fixats per la mateixa cons-

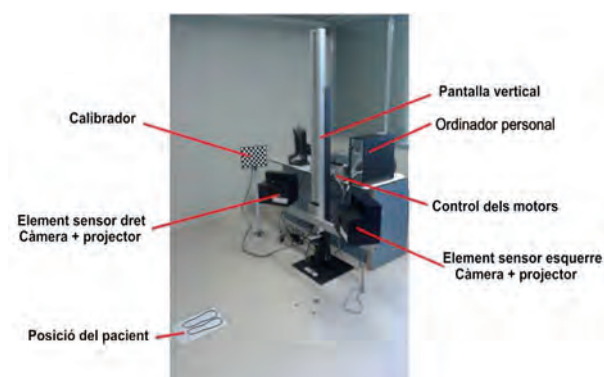


FIGURA 6. Prototip d'escàner 3D desenvolupat al CD6 per a la mesura de zones extenses del cos humà.

trucció de l'aparell. En el nostre cas, aquests paràmetres són ajustables de manera dinàmica durant el funcionament de l'aparell. Això pot ser extremament útil en aplicacions avançades en les quals es requereixi augmentar el nivell de detall de la mesura segons les condicions de l'escena. De la mateixa manera, també pot servir per augmentar la velocitat de refrescament quan es requereixi la mesura d'objectes amb moviments ràpids. Aquest canvi de propietats de mesura es pot adaptar de manera dinàmica segons la informació aportada per sensors externs. Per exemple, permet combinar la informació processada d'una càmera 2D per identificar en quines situacions convé incrementar la resolució espacial de la imatge o augmentar la seva velocitat de refrescament.

D'altra banda, el sistema desenvolupat al CD6 ha incorporat un conjunt d'innovacions que li permeten oferir unes prestacions superiors respecte a la tecnologia de detecció de polsos. Normalment, els sistemes de temps de vol fan servir fotodíodes d'allau (APD) o fotodíodes PIN com a element de detecció. Aquests components solen tenir un guany de l'ordre de 10^2 . En canvi, el prototip desenvolupat utilitza un nou tipus de detector anomenat *fotomultiplicador de silici* (SiPM) que permet detectar quantitats de llum enormement petites, nominalment de l'ordre de fotons aïllats amb un guany de l'ordre de 10^6 (Yamamoto *et al.*, 2006). Aquest augment de sensibilitat permet detectar polsos reflectits de molt baixa potència, fa que la distància mesurable sigui més gran i permet l'ús de làsers de menor potència, i més barats i segurs.

Les figures 9 i 10 mostren una sèrie d'imatges mesurades amb el prototip construït. En la primera s'aprecia una escena complexa amb multitud d'objectes a diferents distàncies. La segona mostra una paret on s'aprecia l'aug-



FIGURA 7. Mesures 3D amb textura RGB de color de cara d'una pacient obtinguda amb l'escàner 3D desenvolupat en el CD6. La topografia 3D de la cara es mostra amb una petita subzona rectangular seleccionada a través de la interfície d'usuari de l'escàner, que permet calcular paràmetres d'interès de la pell com el volum i la rugositat.

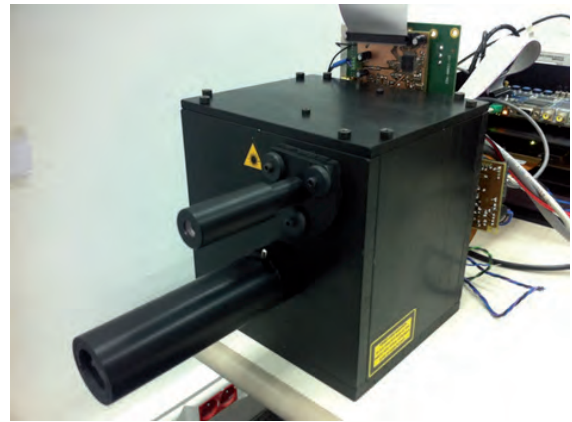
ment lineal de la distància en la mesura tridimensional. Aquestes mostres han estat preses a baixa resolució, 64×48 píxels. El prototip construït no ha estat dissenyat per capturar imatges d'alta resolució espacial, sinó per demostrar la viabilitat de la tecnologia i per a la realització de proves de concepte. No obstant això, es troba en construcció una segona versió que permetrà escalar les capacitats actuals del sistema considerablement. La taula següent mostra un resum de les capacitats esperades del muntatge en construcció.

Un altre gran avantatge del sistema desenvolupat és que supera el problema dels sistemes *lidar* concebuts per mesurar en ambients exteriors, que tenen el desavantatge afegit d'haver de ser compatibles amb condicions atmosfèriques adverses. La pluja, la boira, la neu i la pols poden afectar negativament la fiabilitat de l'aparell, així com la llum solar intensa. En aquest cas, la tecnologia de temps de vol polsada ofereix solucions molt més fiables que no pas la tècnica modulada, la qual és molt inestable en ambients exteriors. Els *lidars* d'última generació incorporen tecnologia que permet mesurar amb fiabilitat en condicions de temps adverses, emprant làsers en l'espectre infraroig que interaccionen molt menys amb les molècules

Paràmetre	Valor	Comentari
Distància	1.000 m	Distància i camp de visió són inversament proporcionals
Camp de visió	70°	
Resolució espacial	640 × 360 píxels	Resolució espacial i velocitat de refrescament són inversament proporcionals
Velocitat de refrescament	15 Hz	
Resolució angular	0,01° (azimut) 0,01° (elevació)	Resolució angular depèn del camp de visió i de la resolució espacial
Resolució en distància	±1,5 cm	



a)

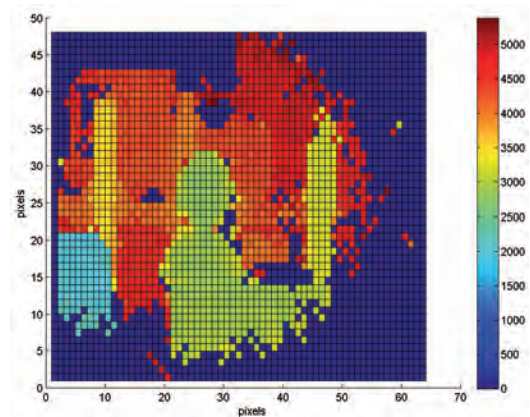


b)

FIGURA 8. Càmera de temps de vol desenvolupada al CD6: a) vista frontal i b) vista lateral.



a)

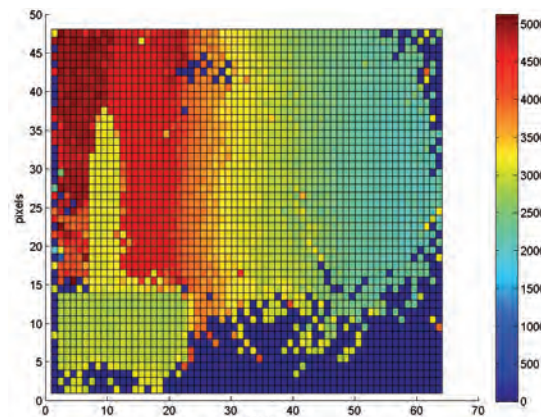


b)

FIGURA 9. a) Escena real mesurada. b) Resultat de la mesura amb la càmera de temps de vol desenvolupada al CD6.



a)



b)

FIGURA 10. a) Escena real mesurada. b) Resultat de la mesura amb la càmera de temps de vol desenvolupada al CD6.

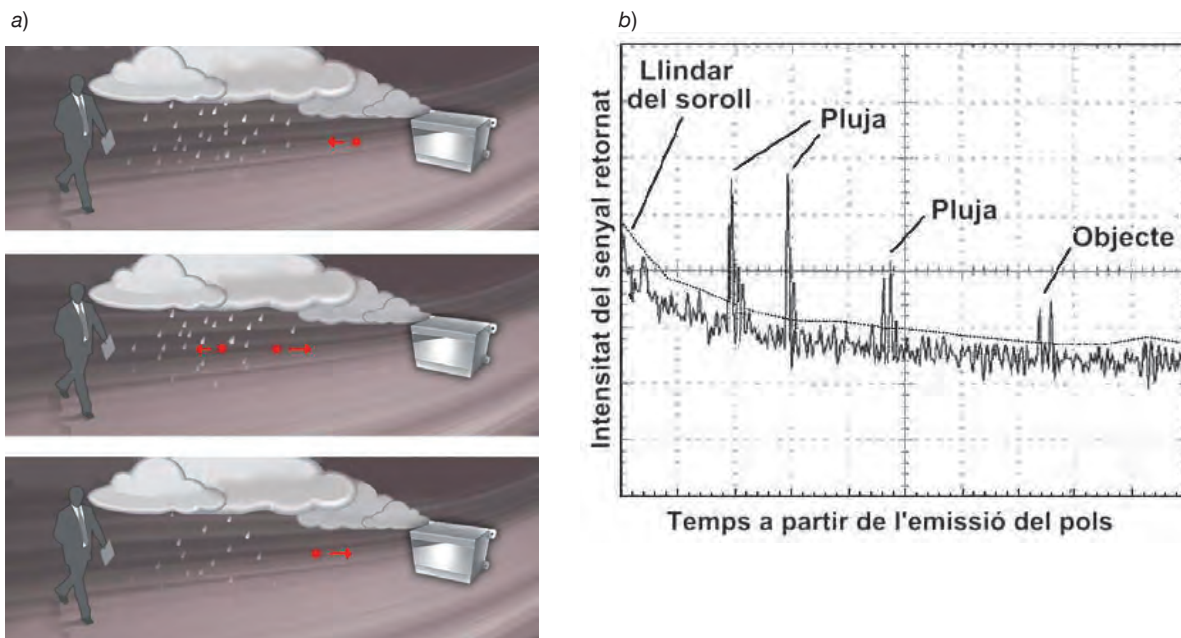


FIGURA 11. Efectes òptics sota condicions atmosfèriques adverses: a) exemple d'emissió d'un pols de làser amb múltiples reflexions causades per la pluja (IBEÓ) i b) efecte en el senyal reflectit rebut (Stone *et al.*, 2004).

d'aigua que conté l'atmosfera (Schilling *et al.*, 2002). D'altra banda, cal tenir en compte també els efectes provocats pels diferents fenòmens meteorològics. Per exemple, la pluja provoca que per cada pols de làser enviat es produeixin múltiples subpolsos que arriben al detector provocats per les diferents gotes d'aigua que el pols original ha travessat. Per tant, és necessari utilitzar circuits de mesura de temps amb capacitat de mesura de múltiples reflexions de polsos per un únic pols emès (Niclass *et al.*, 2013) (figura 11).

Quant a les aplicacions (Hansard *et al.*, 2012), se'n podrien destacar una gran varietat, a les quals s'estan aplicant totalment o parcialment les càmeres ja existents: seguretat, vigilància, visió artificial, guiatge de vehicles, robòtica, multimèdia, creació de continguts 3D, detecció i seguiment d'objectes o transport. Tota una bateria de possibles aplicacions a les quals les càmeres de temps de vol ja s'estan aplicant i que esperem que pugui millorar-se substancialment, entre altres propostes tecnològiques, amb les que fem des del CD6.

4. Conclusions

Existeix una gran varietat de famílies de tècniques òptiques de mesura per a superfícies extenses que permeten obtenir reconstruccions 3D detallades dels objectes observats. Entre aquestes, en aquest article hem destacat per la generalitat de les seves aplicacions l'estereoscòpia amb projecció de franges i la imatge de temps de vol. En el moment de seleccionar la tècnica més adient per a una aplicació concreta cal tenir en compte en especial les especificacions de resolució, cost i temps disponible, tant per a la

realització de la mesura com per al seu processament posterior. Les dues tècniques que hem descrit permeten, amb prestacions diferents adaptables a l'aplicació que es consideri, donar resposta a un gran nombre de problemàtiques d'interès industrial, científic i mèdic. Hem presentat, a més, els darrers resultats obtinguts al CD6 de la UPC en totes dues tècniques, que inclouen la construcció i el desenvolupament de prototips complets orientats a aplicacions específiques en els àmbits industrial i mèdic. ■

Referències

- AILISTO, H.; HEIKKINEN, V.; MITIKKA, R.; MYLLYLÄ, R.; KOSTAMOVARA, J.; MANTYNIEMI, A.; KOSKINEN, M. «Scannerless imaging pulsed-laser range finding». *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 4, núm. 6 (2002), p. 337-346.
- D'APUZZO, N. «3D Scanning of the human body». *Presentation at Essilor* [France], (2009).
- FORRESTER, P. A.; HULME, K. F. «Laser rangefinders». *Optical and Quantum Electronics*, vol. 13, núm. 4 (1981), p. 259-293. <<http://www.graphics.com/modules.php?name=Sections&op=viewarticle&artid=787&page=2>>
- HANSARD, M.; LEE, S.; CHOI, O.; HORAUD, R. *Time-of-flight cameras: Principles, methods and applications*. Springer, 2012. (Springer Briefs in Computer Science; 1)
- IBEÓ. <<http://ibeo-as.com/index.php/en/ibeotechnology/weather-performancev>>
- JASPERS, S.; HOPERMANN, H.; SAUERMAN, G.; HOPPE, U.; LUNDERTADT, R.; ENNEN, J. «Rapid in vivo measurement of the topography of human skin by active image triangulation using a digital micromirror device». *Skin Research and Technology*, vol. 5 (1999), p. 195-207.

- LANGE, R.; SEITZ, P. «Seeing distances - a fast time-of-flight 3D camera». *Sensor Review*, vol. 20, núm. 3 (2000), p. 212-217.
- LANGE, R.; SEITZ, P.; BIBER, A.; SCHWARTE, R. «Time-of-flight range imaging with a custom solid-state image sensor». A: *Laser metrology and inspection*. Bellingham, SPIE, 1999. (Proceedings of SPIE; 3823).
- MAATTA, K.; KOSTAMOVAARA, J.; MYLLYLÄ, R. «Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques». *Applied Optics*, vol. 32, núm. 27 (1993).
- MILROY, M. J.; BRADLEY, C.; VICKERS, G. W. «Automated laser scanning based on orthogonal cross sections». *Machine Vision and Applications*, vol. 9, núm. 3 (1996), p. 106-118.
- NICLASS, C.; SOGA, M.; MATSUBARA, H.; OGAWA, M.; KAGAMI, M. «A 0.18µm CMOS SoC for a 100m-Range 10fps 200x96-Pixel Time-of-Flight Depth Sensor». *International Solid-State Circuits Conference. Image Sensors*, secció 27 (2013).
- OULU. <<http://herkules oulu.fi/isbn9514269667/html/c305.html>>.
- PEREZ, F.; VERA, S.; LARA, L.; HERRERO JOVER, J.; GONZÁLEZ BALLESTER, M. A.; ARES, M.; ROYO, S.; CAMPDERRÓS, L.; PANYELLA, D. «Quantitative evaluation of the effectiveness of cosmetic treatments and aesthetic surgical interventions based on surface scans». A: *Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2012*. Pisa, 27-30 juny 2012.
- ROYO, S.; SUC, V.; SERGIEVSKAYA, I.; ATASHKHOEI, R.; ARES, M.; SEGURA, J.; GALCERÁN, J.; PANYELLA, D.; COLL, J. «Photogrammetric fringe projection for in-vivo skin topography measurements». *Libro de Actas de la 6ª Reunión Nacional de Optoelectrónica Optoel 09*. Màlaga, 2009, p. 295-298.
- SCHILLING, B.; BARR, D.; TEMPLETON, G.; MIZERKA, L.; TRUSSELL, C. «Multiple-return laser radar for three dimensional imaging through obscurations». *Applied Optics*, vol. 41, núm. 15 (2002).
- SCHWARZ, L.; MKHITARYAN, A.; MATEUS, D.; NAVAB, N. «Human skeleton tracking from depth data using geodesic distanced and optical flow». *Image and Vision Computing*, vol. 30, núm. 3 (2012), p. 217-226.
- STELZER, S.; SCHREIBER, S.; SCHOENE, C. «Utilisation of 3D Face Scanner in Medical Faculty». A: *3D Modelling, Proceedings of Conference*. París, 13-14 juny 2006.
- STONE, W.; JUBERTS, M.; DAGALAKIS, N.; STONE, J.; GORMAN, J. *Performance analysis of next generation LADAR for manufacturing, construction and mobility* [en línia]. National Institute of Standards and Technology. Building and Fire Research Laboratory, 2004. <http://www.stoneaerospace.com/about-us/NISTIR_7117_Final_Complete2.pdf>.
- XU, Z.; SCHWARTE, R.; HEINOL, H.; BUXBAUM, B.; RINGBECK, T. «Smart Pixel - Photometric Mixer Device (PMD) New System Concept of a 3D Imaging-on-a-Chip». A: *5th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. Nanquín, 1998, p. 259-264.
- YAMAMOTO, K.; YAMAMURA, K.; SATO, K.; OTA, T.; SUZUKI, H.; OHSUKA, S. «Development of Multipixel Photon Counter: MPPC». *IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record*, núm. 30-102 (2006).